



FlexRay — die Grenzen des physikalischen Layers

Harald Gall, Andy Fewster, Thomas Lücker

(05/11/2007 3:43 AM EDT)

URL: <http://www.eetimes.eu/germany/199500946>

Mit Datenraten von 10 Megabit pro Sekunde soll der FlexRay-Bus die Elektronikmodule kommender Fahrzeug-Generationen vernetzen. Die Anforderungen an Fehlertoleranz, Störsicherheit und Minimierung eigener elektromagnetischer Abstrahlungen stellen Chipherstellern hohe Hürden entgegen.

FlexRay ist ein äußerst flexibles, schnelles und fehlertolerantes Bussystem, das deterministisches Verhalten ebenso wie ereignisgesteuerte Mechanismen unterstützt. Dieses in Fahrzeugen zur Anwendung kommende Bussystem ermöglicht den Einsatz verschiedener Netzwerktypologien mit einer Datenrate von 10 Mbps – einer Bandbreite, die in Bordnetzen zwar schon zuverlässig auf Glasfaserkabeln erreicht wurde, nicht jedoch auf herkömmlichen Kupferkabeln. Die Verwendung teurer Kabel im Automobilbereich, wie Lichtwellenleiter oder abgeschirmter Kabel, ist aufgrund der hohen Integrationskosten nur beschränkt möglich. FlexRay gilt als das Kfz-Netzwerk der nächsten Generation, das Flexibilität, Stabilität, Robustheit, Funktionssicherheit und Zuverlässigkeit in sich vereinen soll. Zu diesem Zweck müssen die physikalischen Grenzen auf der untersten Schicht, des FlexRay Electrical Physical Layer, definiert werden.

Die physikalische Schicht von FlexRay stützt sich auf vier Hauptsäulen: Hohe Geschwindigkeit, Vernetzung, Flexibilität sowie Funktionssicherheit und Zuverlässigkeit. Ein wesentliches Ziel der Automobilindustrie ist die Gewährleistung geringer elektromagnetischer Emissionen im Fahrzeug, weshalb der bestehende Industriestandard RS485, der auch auf Kupferdraht eine Datenrate von 10 Mbps erreicht, nicht umsetzbar ist.

Die Flexibilität von Kfz-Bordnetzen bezieht sich auf ihre Fähigkeit, bestimmte Netzformen mit unterschiedlicher Kabellänge und korrekter Terminierung bilden zu können.

FlexRay unterstützt drei Netzwerktopologievarianten, die zu einem hybriden Netzwerk kombiniert werden können:

- Passive Liniennetze (bekannt vom CAN - Controller Area Network)
- Passive Sternnetze
- Aktive Sternnetze

Um eine Abschätzung oder Berechnung der Netzwerkeigenschaften möglicher Topologien zu ermitteln, ist in [Abbildung A](#) ein Beispiel einer "Worst-Case"-Topologie dargestellt, welche als Basis für Simulationen herangezogen werden kann. Zu berücksichtigen sind dabei sämtliche Netzleitungen, einschließlich typischer und maximaler Kabellängen. Zusätzlich muss die in einem Fahrzeug tatsächlich verwendete Topologie individuell simuliert und auf Basis der FlexRay-Spezifikation getestet werden.

Die Implementierung passiver Netze stellt eine besondere Herausforderung dar. FlexRay-Knoten, die mit einem aktiven Sternnetz verbunden sind, sollten immer eine korrekte Terminierung aufweisen. Eine 100%-ige Terminierung aller Knoten erschwert jedoch die Erweiterung des Netzes und der DC-Buslast und ist aus Kostengründen nicht realisierbar. Terminierungskonzepte verbieten normalerweise Impedanzstufen auf der Leitung, die jedoch auftreten, wenn Abschlusswiderstände in die Übertragungsleitung eingebaut werden (Impedanzanpassung). In passiven Netzen müssen die beiden Knoten, zwischen denen der größte Drahtabstand besteht, mit einem Abschluss versehen werden, der der nominalen Kabelinduktivität zwischen den beiden Punkten entspricht. Das beste Terminierungskonzept für FlexRay-Netze ist die Split-Terminierung ([Abbildung E](#)), wobei jeweils die Hälfte der Kabelinduktivität zwischen den beiden Busleitungen auf Masse gelegt wird. Zusätzlich sollte zwischen Bustreiber und Terminierung eine Gleichtaktdrossel eingebaut werden. Buserminierung und Netzwerkflexibilität sind mitunter widersprüchliche Forderungen, da Flexibilität die bedarfsmäßige Erweiterung eines Knotens oder die Verkleinerung eines Netzwerks voraussetzt. Um in so einem Fall die Integrität des Netzwerks zu gewährleisten, muss die vor der Knotenerweiterung oder -reduktion berechnete nominale Impedanz gegebenenfalls im Nachhinein angepasst werden. Für die Erweiterung oder Verkleinerung eines Systems sind nur aktive Sternanschlüsse empfehlenswert. Doch auch die Parameter dieses Anschlusses müssen vor der Entwicklung des Bussystems definiert werden, damit die wünschenswerte Flexibilität des aktiven Sternnetzes gegeben ist. In vielen Fällen werden Bauweise und Flexibilität durch die Kosten der Grundstruktur eingeschränkt. Zudem wirkt sich auch das Streben nach optimaler Flexibilität nachteilig auf die Netzwerkstabilität aus. Deshalb definiert FlexRay die maximale Kabellänge der Stichleitungen und der passiven Sternverbindung, um Systemdesigner bei der Entwicklung von Anwendungen zu unterstützen.

Die Funktionssicherheit – eine der Hauptanforderungen an Netzwerke, insbesondere im Automobilbereich, – setzt die genaue Kenntnis der einwirkenden Umweltfaktoren voraus. Die Unterstützung eines Temperaturbereichs von -40°C bis $+125^{\circ}\text{C}$ ist eine grundlegende Forderung, die nahezu alle Automobilanwendungen erfüllen müssen. Bei der Definition der physikalischen Schicht der FlexRay-Spezifikation müssen jedoch noch weitere Einflüsse berücksichtigt werden. Diese können allgemein in statische und stochastische (zufällige) Effekte unterteilt werden. Statische Effekte können unter benutzerdefinierten Bedingungen evaluiert werden, die Beurteilung stochastischer Effekte ist dagegen wesentlich schwieriger.

Ferner können die Anforderungen an ein funktionssicheres Netz in aktive betriebliche Parameter (d. h. jene, die nur während des Betriebs gegeben sein müssen) und passive, nicht-betriebliche Parameter (d. h. jene, die für die generelle Zulassung von Komponenten und Bausteinen für Kfz-Netze gegeben sein müssen) untergliedert werden. Sehr oft basieren die passiven, nicht-betrieblichen Anforderungen auf Belastungswerten, die vom jeweiligen Lieferanten garantiert werden müssen.

Einige Anforderungen in Bezug auf die Belastbarkeit sind:

- ESD (elektrostatische Entladung)
- Stromwerte (nicht-betriebliche – Spannungsversorgung, Stromversorgung)
- Thermoschock/Temperaturwechsel
- Feuchtigkeit
- Vibrationen
- Mechanische Stöße

Betriebliche Anforderungen sind:

- Betriebstemperaturbereich
- Betriebliche Stromwerte (Spannungsbereich, Stromverbrauch und -versorgung, Masseversatz, Lastabwurf)
- Emissionen von RF-Störungen
- Immunität gegen RF-Störungen
- Immunität gegen kurzzeitige Spannungsspitzen

Statische Einflüsse auf das Systemverhalten werden verursacht durch:

- Bauweise des Steuergeräts
- Terminierungskonzept an der Ausgangsstufe
- Verhalten der Halbleiter
- Netztopologie
- Netzverdrahtung

Stochastische Einflüsse auf das Systemverhalten werden vor allem verursacht durch:

- Emissionen von RF-Störungen
- Immunität gegen RF-Störungen
- Immunität gegen kurzzeitige Spannungsspitzen

Bei der Entwicklung eines funktionssicheren FlexRay-Netzwerks für Automobilanwendungen gilt es, diese bekannten Einflüsse zu quantifizieren, ihre Auswirkung auf das System zu bewerten und in die Systemspezifikation einzubeziehen. Die Spezifikation sollte außerdem Toleranzen für unvorhergesehene Umwelteinflüsse beinhalten.

Zu beachten ist insbesondere, dass die Daten der endgültigen Spezifikation teilweise nur durch Simulation, Schätzung oder schrittweise Näherungsverfahren in Simulationstests gewonnen werden können. Physikalische Größen, wie der Aufbau des Steuergeräts und die Eigenschaften des Chips liegen im Verantwortungsbereich des Halbleiter- oder Komponentenlieferanten, der sie entsprechend garantieren muss. Für andere Bedingungen, wie die Netzwerktopologie und Kabelführung im Fahrzeug, ist der Fahrzeugentwickler verantwortlich. In den letzten Jahrzehnten sind Testmethoden entwickelt worden, mit denen Systeme unter tatsächlichen Umweltbedingungen evaluiert werden können.

Um die Signalintegrität in allen acht möglichen FlexRay-Netztopologien ([Abbildung B](#)) zu evaluieren, werden an den unterschiedlichen Testpunkten die Signalintegrität gemessen ([Abbildung D](#)). Durch die Definition der Augendiagramme an jedem Testpunkt im gesamten System lassen sich statische Einflüsse auf das System ermitteln. Entspricht die Signalintegrität der Definition, wurden die statischen Effekte berücksichtigt und das System ist somit funktionsfähig. Schwieriger gestaltet sich die Situation bei stochastischen Einflüssen. Sie können in die Augendiagramme zwar miteinbezogen werden, sind jedoch wegen ihres nur zufälligen Auftretens nicht leicht messbar. Stochastische Effekte werden hauptsächlich durch EMV-Einwirkung hervorgerufen, wie

beispielsweise von umliegenden transienten oder RF-Feldern. Sporadisch erzeugte Effekte können durch Signalintegritätstests in der TEM-Zelle und Augendiagrammen nachgebildet und in Messungen gezeigt werden. Der Frequenzbereich während dieser Messungen ist entsprechend der Messvorschrift variabel. Wesentlich schwieriger ist die Erfassung sporadisch auftretender Glitches auf Busleitungen. Glitches können durch transiente Impulse auf Bus- oder Spannungsversorgungsleitungen ausgelöst werden, ihre Messung mit Hilfe des Augendiagramms während eines transienten Impulses ist jedoch problematisch. Fest steht, dass Hochspannungs- oder Stromimpulse auf Busleitungen nicht von der physikalischen Schicht herausgefiltert werden können, insbesondere wenn diese Impulse hohe Rauschwerte aufweisen oder lange andauern. Noch komplizierter wird die Situation, wenn unterschiedliche Zeitbasen vorliegen, wie beispielsweise bei der Detektierung der Busaktivität. Normalerweise verfügen Bustreiber über keine interne Zeitbasis zum Erkennen der Busaktivität. In den meisten Fällen, wenn Impulse direkt in Busübergangsphasen eingespeist werden, wie beispielsweise beim Übergang vom aktiven Buszustand zum Idle-Zustand, entsteht eine Übergangsunsicherheit auf der Bustreiberseite, was zu Verzögerungen bei der Detektierung oder zu einer falschen Detektierung des Buszustands führen kann.

In diesem Fall sind digitale Filter-Plug-ins oder CRCs (zyklische Redundanzprüfungen) nötig, damit die Datenübertragung nicht gestört wird oder gar ungültige Daten in den Nutzdatenstrom gelangen.

Wichtige physikalische Parameter in einem FlexRay-Netz sind:

- Signalintegrität
- Asymmetrische Übertragungsverzögerungen
- Symmetrische Übertragungsverzögerungen
- Anstiegs- und Abfallflanken von Datenströmen auf Busleitungen

Die Signalintegrität wird mit den definierten Augendiagrammen verifiziert ([Abbildung F](#)). Das Ergebnis hängt einerseits von der Streuung des übermittelten Signals über die Übertragungsleitung und andererseits vom erforderlichen Spannungspegel und der nötigen Bitzeit ab. Aufgrund der Komplexität realer Netzwerke werden heute in implementierten Systemen zumeist nur statische Einflüsse validiert. Falls das gemessene Signal dem spezifizierten imaginären Trapez nicht entspricht, müssen zusätzliche asymmetrische Verzögerungszeiten bei der Systemauslegung einkalkuliert werden. Dabei ist zu beachten, dass Signale gemäß den Produktspezifikationen, als ungültige Daten auf der Empfängerseite erkannt werden, wenn der Spannungswert unterhalb dem spezifizierten Wert liegen.

Asymmetrische Übertragungsverzögerungen sind bereits in der aktuellen FlexRay Electrical Physical Layer Specification 2.1 Rev B definiert. Es wird davon ausgegangen, dass jede einzelne Komponente auf einer Netzleitung asymmetrische Verzögerungen hervorruft ([Abbildung B](#)), die auch die Bitzeit für High- oder Low-Zustände verkürzen und verlängern. Zur detaillierten Validierung der Auswirkungen kumulativer unsymmetrischer Verzögerungen auf der Bustreiberseite kommt das DPI-Messverfahren (Direct Power Injection) zum Einsatz. Dabei wird eine Signalstärke von +36 dBm auf die Busleitungen eingespeist und die asymmetrischen, vom Bustreiber hervorgerufenen Verzögerungen gemessen. Dies ist eine gute Validierungsmethode für die physikalische Schicht, die auch stochastische Einflüsse, wie elektromagnetische Immunität, einbezieht. In [Abbildung H](#) wurden diese Messungen mit dem FlexRay-Transceiver AS8221 von austriamicrosystems durchgeführt. Dieser IC liefert hervorragende Werte und demonstriert dazu, wie wichtig ein korrekt angewandte externe Terminierung der Busleitung ist.

Symmetrische Übertragungsverzögerungen sind in der FlexRay-Spezifikation zurzeit mit 2.500 ns definiert. Dieser Wert wird zwischen dem TxD-Pin am sendenden Bustreiber und dem RxD-Pin am

empfangenden Bustreiber gemessen.

Die Slewrates werden durch Triggerung an den Flanken der übertragenen Bits gemessen. Diese Werte müssen in einem Bustreiber so konzipiert sein, dass die elektromagnetischen Emissionen möglichst gering gehalten werden. Die Wahl der internen Bauelemente, das korrekte Chiplayout für die Eigenschaften (wie Spannungspegel und Symmetrie) zur Erlangung einer optimalen Emissionsleistung obliegt der Erfahrung des Chip-Entwicklers.

Schließlich wirken sich auch Störungen, die von transienten Impulsen hervorgerufen werden, kritisch auf Netzwerke aus. Transiente Impulse auf Busleitungen können Glitches hervorrufen, die wegen ihres zeitlichen Auftretens in Verbindung mit den bestehenden Toleranzen der Widerstandswerte vom Bustreiber nicht herausgefiltert werden können. Im Allgemeinen können Glitches ein Bit verändern, was von der CRC-Prüfsumme zwar entdeckt wird, aber den Verlust eines Message Frames bedeuten könnte. Die ISO-Norm 7637-2 definiert Prüfimpulse, die spezielle Bedingungen im automobilen Umfeld festlegen. [Abbildung G](#) zeigt einen dieser Prüfimpulse in Automobilanwendungen.

Von der Gründung des FlexRay-Konsortiums an schien es unverzichtbar, Halbleiterhersteller in den Entwicklungsprozess einzubinden, da dem Verhalten der speziell für FlexRay entwickelten Chips erhebliche Bedeutung zukommt. Wie in jedem Bussystem gibt es auch hier zwei Typen von ICs (integrierte Schaltkreise): den digitalen Teil, der den Protokoll-Handler, auch Communication Controller genannt, enthält, und den analogen Baustein zur Übersetzung der digitalen Bussignale in analoge und umgekehrt.

Da FlexRay das erste Hochgeschwindigkeitsnetz der Automobilindustrie ist, das Kupferkabel mit einer Bandbreite von 10 Mbps unterstützt, wird dem Bustreiber besonders große Beachtung geschenkt. Dabei müssen die Einflüsse auf Chip-Ebene auf die Transmitter- und Empfängerseite berücksichtigt werden. Selbst der Produktionsvorgang des Bustreibers spielt eine wesentliche Rolle. Schließlich werden nach der Komponentenqualifikation Werte, wie Busspannungspegel, Toleranzen für Konversionsgrenzwerte und asymmetrische Übertragungsverzögerungen, vom Bustreiberhersteller entsprechend der Spezifikation im Datenblatt garantiert.

In [Abbildung J](#) ist der Anteil des Transmitters an der asymmetrischen Übertragungsverzögerung und in [Abbildung K](#) jener des Empfängers dargestellt. Der Transmitter verursacht asymmetrische Übertragungsverzögerungen aufgrund von zeitlichen Abweichungen von den Anstiegs- und Abfallflanken und durch die Form des Schaltpunktes bei der Umschaltung vom High-Side- auf den Low-Side-Ausgangstreiber. An der Eingangsstufe des Bustreibers werden asymmetrische Übertragungsverzögerungen hauptsächlich durch Toleranzen bei den Hysteresegrenzwerten bewirkt. Es ist deshalb unbedingt erforderlich, die Empfängerstufe unter Beachtung des Bit-Timings und der Spannungshysterese möglichst exakt zu konzipieren. Der Empfänger kann keine völlig deformierten Busleitungssignale verarbeiten. Wie [Abbildung F](#) zeigt, muss das Signal zumindest die spezifizierten Signalintegrität aufweisen, damit die Daten korrekt empfangen und gewandelt werden können.

Ein funktionierendes FlexRay-Netzwerk erfordert nicht nur die genaue Kenntnis des Netzverhaltens, sondern auch einen guten Spürsinn bei der Entwicklung des optimalen Bustreibers. Der Halbleiterlieferant ist durch die zeitgerechte Bereitstellung eines Bustreibers, der die flexible und zuverlässige Hochgeschwindigkeits-Vernetzung sicherstellt, maßgeblich am Erfolg des endgültigen Netzaufbaus beteiligt.

Die Bemühungen, dem physikalischen Verhalten ebenso wie möglichen stochastischen Einflüssen Rechnung zu tragen, bewirken ein bestmögliches Kompromissdesign. FlexRay ist funktionsfähig und wird auch in der Lage sein, Anwendungen wie X-by-wire zu unterstützen. Doch noch sind enorme Anstrengungen im Bereich der Systemvalidierung erforderlich, um Automobilnetzwerke erfolgreich implementieren zu können. Mehrere Projekte, insbesondere innerhalb des FlexRay-

Konsortiums, haben die Funktionsfähigkeit von FlexRay bewiesen. Nun tritt seine Entwicklung in das Endstadium ein, in dem Bustreiber konzipiert werden, die die Sicherheit des Netzwerks garantieren. Ein Hauptziel des neuen Bussystems war die Erhöhung der Netzwerkgeschwindigkeit, und das wird bereits gewährleistet. Für den Einsatz in X-by-wire-Anwendungen, ist aber noch mehr als der deterministische und fehlertolerante Ansatz von FlexRay zu berücksichtigen. Die Kombination von FlexRay mit Redundanzkonzepten, wie sie bereits in der Luftfahrt oder in Industrieanwendungen eingesetzt werden, sind notwendig, um die ausfallsichere Nutzung im Automobil gewährleisten zu können.

Referenzen

[Abbildung A](#): Hybrides FlexRay-Netzwerk

[Abbildung B](#): FlexRay-Komponenten und -Typologien

[Abbildung C](#): Testpunkte zur Messung der Signalintegrität

[Abbildung D](#): Augenöffnung auf TP4

[Abbildung E](#): Split-Terminierung

[Abbildung F](#): Signalintegrität gemessen an TP4 in der Mitte eines passiven Netzknotens ohne Terminierung

[Abbildung G](#): Prüfimpuls 3.a der Norm ISO 7637-2

[Abbildung H](#): DPI-Messung

[Abbildung I](#): Symmetrische Übertragungsverzögerung

[Abbildung J](#): Toleranzen bei der Erzeugung von Bussignalen

[Abbildung K](#): Toleranzen bei Spannungsgrenzwerten am Empfänger

Die Autoren sind bei [austriamicrosystems](#) beschäftigt. Harald Gall ist Product Manager Bus Systems; Andy Fewster ist Engineering Manager und Thomas Lücker, ist Product Manager Wireless.