



Makroaufnahme
von Ethernet-
Kabel im Einsatz

© gorodenkoff | iStock

Autonomes und vernetztes Fahren

Standards und Trends im Automotive-Ethernet-Bereich

Der Umgang mit hohen Datenraten ist die Basis für die Zukunft des Automobils und wird mit der Weiterentwicklung technologischer Netzwerkstrukturen sichergestellt. In Anbetracht dessen gewinnen die Entwicklung von Time-Sensitive-Networking-Mechanismen sowie Sicherheitsaspekte im wachsenden Datenstrom an Gewicht.

Ernest Trupp

Ethernet hat sich seit seiner Einführung als überaus robuste, zuverlässige und flexible Netzwerktechnologie etabliert. Durch die hohe Adaptionrate im Consumer- und Datacenter-Bereich ist eine Vielzahl von Ethernet-Produkten – sowohl Hard- als auch Software – auf dem Markt verfügbar. Über die Zeit ergaben sich immer weitere Anforderungen an Ethernet: zum Beispiel das Aufteilen in logische Subnetze mittels VLAN, das Versorgen von kleineren Geräten mittels Power-over-Ethernet oder das Bereitstellen von redundanten Links für Ausfälle mittels Spanning-Tree-Protokollen. Ethernet bietet ein hohes Maß an Flexibilität, sodass sich die

durch neue Standards entstandenen zahlreichen Neuerungen in Ethernet integrieren ließen. Insbesondere in der Automobilindustrie werden die Vorteile gesehen: laut einer Analyse von technavio wird der Automotive-Ethernet-Markt bis zum Jahr 2027 um weitere 4,6 Milliarden US Dollar (im Vergleich zum Jahr 2022) wachsen.

Die große Bandbreite an technologischen Standards

Um den vielfältigen Anwendungsfällen und deren spezifischen Anforderungen im Automotive-Bereich gerecht zu werden, sind verschiedene Übertragungs-

standards (**Tabelle**) notwendig. Für die Übertragung hochbandbreitiger Daten, wie hochauflösende Kamera- oder LiDAR-Daten, sind höhere Übertragungsraten notwendig, wohingegen für kleine Steuergeräte und Sensoren bereits vergleichsweise kleine Bandbreiten ausreichen. Generell gilt: je höher die mögliche Bandbreite, desto höher der Kostenpunkt für jeweilige Produkte. Durch die Vielzahl an verschiedenen Ethernet-Standards ist eine hohe Flexibilität geboten und es wird ermöglicht, die Übertragungsmethode zu wählen, die den höchsten Kosten-Nutzen-Gewinn bietet. IEEE bietet sowohl für hochbandbreite Anwendungsfälle, beispielsweise

mit 10GBASE-T1, als auch für den niederbandbreitigen Bereich, zum Beispiel mit 10BASE-T1S, Lösungen für die Automobilbranche. Für die hochbandbreitigen Szenarien sind u. a. die Standards 1000BASE-T1, 2.5GBASE-T1, 5GBASE-T1 und 10GBASE-T1 verfügbar, mit maximalen Bandbreiten von respektive 1 Gbit/s, 2.5 Gbit/s, 5 Gbit/s und 10 Gbit/s.

10BASE-T1S – Ethernet für niedrige Datenraten

Speziell für niedrige Datenraten bietet sich der Standard 10BASE-T1S an. Es handelt sich dabei um eine kostengünstige Ethernet-Technologie für Übertragungsgeschwindigkeiten mit bis zu 10 Mbit/s. Sie kann als Halbduplex-Bus mit anderen Teilnehmern betrieben werden, ohne dabei eine Kollisionsdomäne zu bilden. Die meisten Ethernet-Komponenten werden im Punkt-zu-Punkt-Betrieb verwendet, beispielsweise durch den Einsatz von Switches zur Vermeidung von Kollisionen. Mit 10BASE-T1S werden diese Kollisionen durch den Physical-Layer-Collision-Avoidance-Mechanismus (PLCA) gänzlich vermieden, ohne dass Switches notwendig sind. Bei diesem Verfahren wird jedem Knoten im Bus eine eindeutige ID zugeordnet. Reihum hat jeder Knoten die Möglichkeit (Transmit Opportunity, TO) ein Paket auf die gemeinsame Datenleitung zu legen oder zu passen, indem für

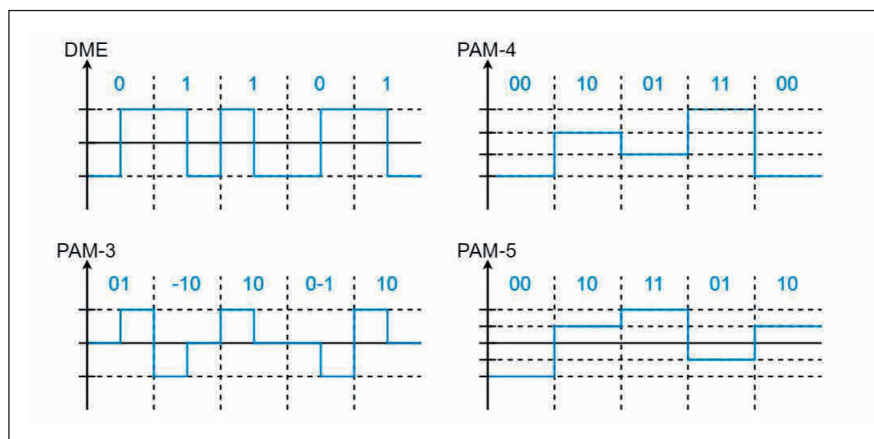


Bild 1: Beispiele für die in Ethernet verwendeten Modulationsverfahren © b-plus

20 Bits abgewartet wird. Sobald jeder Knoten einmal an der Reihe war, beginnt der Zyklus erneut. Anders als beim Time-Division-Multiple-Access-Verfahren (TDMA) braucht es keine Zeitsynchronisierung der Teilnehmer.

Die Vorteile von 10BASE-T1S sind vielfältig: es bietet einen Busbetrieb und somit geringere Verkabelungskosten und Reduzierung der Anzahl der benötigten PHYs, Kollisionsvermeidung ohne die Notwendigkeit für Zeitsynchronisierung, garantierte maximale Latenzen und kostengünstige Hardware-Implementierungen. Jedoch ist 10BASE-T1S weder mit den bisherigen BASE-T noch mit den BASE-T1-Standards kompatibel – andere Leitungskodierungen, veränderte Preamble, etc. Daher wird für die Untersuchung von 10BASE-T1S-Datenverkehr ebenfalls ein

Medienkonverter verwendet.

10GBASE-T1 – Ethernet für hohe Datenraten

Für einige Anwendungen im Fahrzeug, wie hochauflösende Kameradatenübertragung oder Infotainment, werden höhere Übertragungsraten als 1 Gbit/s benötigt. Hier kommt die 10GBASE-T1-Technologie ins Spiel: über ein einziges Adernpaar werden bis zu 10 Gbit/s übertragen. Möglich machen da zum einen die – im Vergleich zu 1000BASE-T1 – deutlich höhere Symbolrate von 5625 MBd, als auch die PAM-4-Modulation, die durch die feinere Auflösung mehr Informationen übertragen kann als PAM-3. Solch hohe Datenraten erhöhen die EMV-Anforderungen an die Hardware, Steckverbinder und Kabel um ein erhebliches Maß, das u. a. den Einsatz von geschirmten Kabeln erforderlich macht. Auch 10GBASE-T1 ist nicht kompatibel zum klassischen 10GBASE-T: die Leitungskodierungen, Symbolraten und Kabelarten unterscheiden sich. Für die Übersetzung von 10GBASE-T zu 10GBASE-T1 und umgekehrt ist somit ebenfalls ein geeigneter Medienkonverter notwendig.

Notwendigkeit von Medienkonvertern und TAPs

Um den Anforderungen im Automotive-Bereich, insbesondere den EMV- und Kostenvorgaben, gerecht zu werden, kommen bei den BASE-T1-Standards statt den üblichen vier bzw. zwei Adernpaaren ausschließlich Single-Pair-Ethernet-Kabel mit einem einzigen verdrehten Adernpaar zum Einsatz. Auch die Lei-

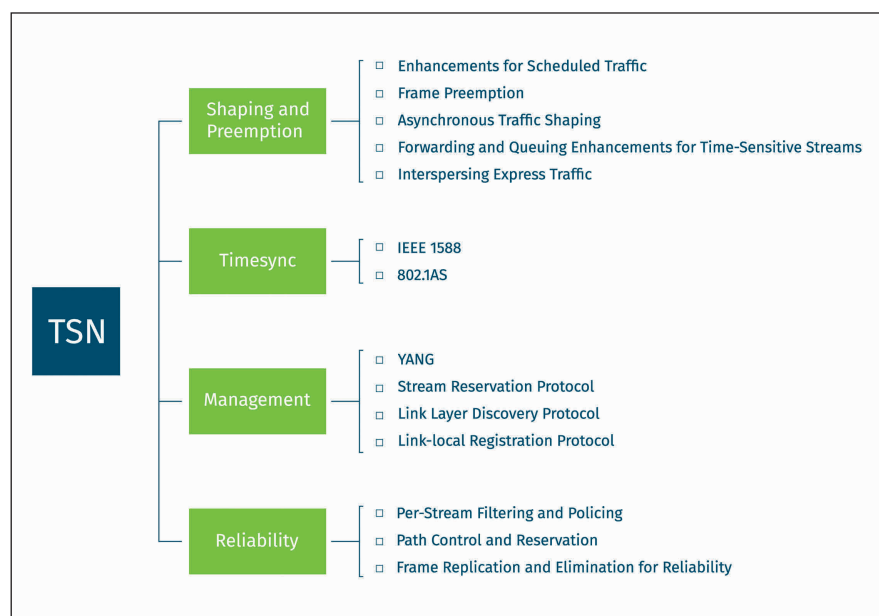


Bild 2: TSN Mind-Map © b-plus

	100BASE-TX	100BASE-T1	1000BASE-T	1000BASE-T1	10GBASE-T	10GBASE-T1	10BASE-T1S
Übertragungsgeschwindigkeit	100 Mbit/s	100 Mbit/s	1000 Mbit/s	1000 Mbit/s	10 Gbit/s	10 Gbit/s	10 Mbit/s
Anzahl Aderpaare	2	1	4	1	4	1	1
Symbolrate	125 MBd	66,67 MBd	125 MBd	750 MBd	800 MBd	5625 MBd	12,5 MBd
Leitungscode, Modulation	4B5B + NRZI, MLT-3	4B3B + PAM-3	8B9B + PAM-5	80B81B + PAM-3	DSQ128 + PAM-16	64B65B + PAM-4	4B5B + DME
Max./Min. Leitungslänge	max. 100 m	min. 15 m	max. 100 m	min. 15 m/40 m	max. 100 m	min. 15 m	min. 25 m (halb-duplex)
Abschirmung notwendig						x	

Tabelle: Übersicht über die Ethernet-Übertragungsstandards © b-plus

tungskodierungen und Modulationsverfahren (**Bild 1**), zum Beispiel 4B3B und PAM-3 bei 100BASE-T1 und 4B5B mit MLT-3 bei 100BASE-TX und Symbolraten, beispielsweise 66,67 MBd bei 100BASE-T1 und 125 MBd bei 100BASE-TX, unterscheiden sich bei diesen Standards. Um vom klassischen Ethernet (100BASE-TX, 1000BASE-T, etc.) zu Automotive Ethernet (100BASE-T1, 1000BASE-T1, etc.) zu übersetzen ist daher der Einsatz von Medienkonvertern notwendig.

Die Vollduplex-Übertragung bei 100BASE-TX funktioniert über getrennte Übertragungs- und Empfangsleitung. Das ermöglicht es durch einfaches Aufschalten auf die jeweilige Leitung den Datenverkehr in eine Übertragungsrichtung abzuheben.

Bei den BASE-T1-Standards kommen jedoch ausschließlich Kabel mit einem einzigen Adernpaar vor. Um den beiden Kommunikationspartnern das gleichzeitige Senden zu ermöglichen, werden Hybridschaltungen verwendet, die eine sogenannte Echo Cancellation implementieren. Weil sich nur überlagernde Signale auf der Leitung befinden und ein passiver Zuhörer nicht die einzelnen Sendesignale kennt, können durch einfaches Aufschalten keine sinnvollen Daten abgegriffen werden.

Um hier Abhilfe zu schaffen, kommen spezielle Test-Access-Point-Geräte (TAP) ins Spiel: sie ermöglichen den Abgriff von den überlagerten Datenströmen, wie bei 100BASE-T1 oder 1000BASE-T1, und das Ausleiten dieser auf gängige Ethernet-Schnittstellen, beispielsweise 1000BASE-T. Durch den Einsatz von mehreren Ethernet-Transceivern (PHYs) kann der Datenverkehr erfolgreich abgehört werden, ohne dass es zu Störungen oder Verlusten auf der Kommunikationsstrecke kommt.

Time-Sensitive Networking für Automotive-Ethernet-Netzwerke

Unter dem Begriff Time-Sensitive Networking (TSN) werden eine Reihe von Standards verstanden, die verschiedene Mechanismen bieten, um Ethernet-Netzwerke mit Echtzeitanforderungen aufzubauen (**Bild 2**). Die Ziele von TSN umfassen im Wesentlichen das Garantieren von maximalen Latenzen bei der Paketübertragung und die Vermeidung von Paketverlusten. Zu den vier TSN-Säulen gehören die Shaping-Mechanismen, Methoden zur Erhöhung der Zuverlässigkeit, die Zeitsynchronisierung der Knoten und geeignete Managementprotokolle.

Insbesondere für Automotive-Ethernet-Netzwerke ist TSN essenziell. Jedoch ist durch die Vielzahl an vorhandenen TSN-Standards die Auswahl der geeigneten Technologien nicht immer einfach. In der IEEE Working Group 802.1DG entsteht derzeit ein TSN-Automotive-Profil, also eine vordefinierte Auswahl von Mechanismen und Standards aus der TSN-Familie für den Einsatz im Fahrzeug. Auch hier spielt die Zeitsynchronisierung (IEEE 1588 bzw. 802.1AS) eine zentrale Rolle. Viele der TSN-Mechanismen setzen die hochgenaue, zeitliche Synchronisierung der teilnehmenden Knoten voraus. Das Generalized Precision Time Protocol (gPTP, 802.1AS) kann Geräte im Netzwerk im Submikrosekundenbereich synchronisieren, das zum Beispiel von entscheidender Bedeutung für die Sensorfusion ist.

Eine weitere, elementare Anforderung an die Zeitsynchronisierung im Fahrzeug ist die Unterstützung von mehreren Zeitdomänen: häufig wird mittels GPS auf die TAI-Zeitskala synchronisiert, die den Vorteil bietet, dass alle zeitgestempelten Pakete eine gemeinsame und leicht vergleichbare

Zeitbasis haben. Im Fahrzeug ist GPS jedoch nicht jederzeit verfügbar und nicht alle zeitsensitiven Daten sind auf eine TAI-Zeitbasis angewiesen. Durch das parallele Synchronisieren auf eine zweite Zeitbasis, beispielsweise eine Fahrzeug-lokale Zeit, kann dieser Umstand ausgeglichen werden. Im Vergleich zum älteren IEEE 802.1AS-2011 wurde die neue Version 802.1AS-2020 u. a. um diese Multi-Domain-Funktionalität erweitert. Dieser Standard beschreibt auch eine „external port configuration“, das die manuelle Zuordnung der Portstati erlaubt – ebenfalls eine wichtige Anforderung im Fahrzeugumfeld. Insgesamt ist es für TSN-Anwendungen in Automotive-Ethernet-Netzwerken entscheidend auf Produkte und Technologien zu setzen, die auf IEEE 802.1AS-2020 basieren.

Fazit

Automotive Ethernet und TSN sind aus zukünftigen E/E-Architekturen nicht mehr wegzudenken. Die im Vergleich zu Standard-Ethernet zahlreichen neuen Technologien stellen Ingenieure jedoch vor neue Herausforderungen. b-plus entwickelt für viele Anwendungsfälle im Bereich Automotive Ethernet und TSN-Lösungen: von Medienkonvertern mit TAP-Funktionalität bis hin zu Switch- und Recorderplattformen – ausgestattet mit einer IEEE 802.1AS-2020 konformen Zeitsynchronisation. ■ (eck)

www.b-plus.com



Ernest Trupp ist Forschungsingenieur bei der b-plus technologies GmbH. © b-plus