



Latenz

– ein unvermeidbares, mehr oder weniger störendes Übel bei jeder Kommunikation

Teil 2



Die drahtlose Kopplung elektronischer Geräte per Funkverbindung steigert Bequemlichkeit, Mobilität und Flexibilität der Nutzung. Als Bluetooth vor gut 20 Jahren für die einfache Anbindung von Kopfhörern, Lautsprechern und Autoradios an Audioquellen in der Version 1.0 auf den Markt gebracht wurde, war die Vielfalt weiterer Anwendungen, die Datenrate, die Übertragungssicherheit, der Stromverbrauch, die Reichweite und die Latenz der aktuellen Version 5 noch nicht zu erahnen. Durch die Zusammenstellung bestimmter Protokolle in Gestalt von Profilen lässt sich Bluetooth exakt an den Anwendungszweck anpassen. Für das Internet der Dinge (IoT) im smarten Heim sowie in Handel und Industrie kann Bluetooth viele Aufgaben übernehmen, die heute noch eine Domäne des WLANs sind. Bluetooth wird die Brücke zwischen NFC (Nahfeldkommunikation) und Wi-Fi (Wireless Fidelity) schlagen. Weil in Zukunft jedes neue Smartphone über Bluetooth 5.0 verfügen wird, kann man mit zahlreichen neuen Anwendungen rechnen.



Bluetooth – universeller funkbasierter Datenaustausch im Nahbereich

Als vor etwa 40 Jahren der „Persönliche Computer“ (PC) seinen Siegeszug in die Privathaushalte antrat, waren die Centronicsschnittstelle für den Drucker und die serielle Schnittstelle RS-232 für Peripheriegeräte aller Art (Modems, Plotter, Terminals, Messgeräte, Bildschirme ...) mit klobigen Steckverbindern und sperrigen vieladrigen Kabeln die Anschlussstandards. Mitte der 1990er-Jahre hatte mit der USB-Schnittstelle deren Ablösung durch eine vereinheitlichte Kabelverbindung zur PC-Peripherie begonnen. Aktuelle PCs verfügen gar nicht mehr über Centronics- und RS-232-Schnittstellen.

Bald entstand der Wunsch, die kabelbasierte Anbindung der peripheren Gerätschaften durch eine drahtlose zu ersetzen. Zunächst schien moduliertes Infrarotlicht als Grundlage für eine optische Punkt-zu-Punkt-Verbindung gute Chancen zu haben. 1993 hatte die Infrared Data Association (IrDA), ein Zusammenschluss von etwa 50 Unternehmen, damit begonnen, die Grundlage für die Standardisierung von Infrarot-Transceivern und den zugehörigen Protokollen zu legen. Jedoch ließ die Notwendigkeit einer direkten Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger (line of sight) die durchaus vorhandenen Vorteile von IrDA in Bezug auf Datendurchsatz, Abhörsicherheit, Energieverbrauch und Zuverlässigkeit in den Hintergrund treten. Eine drahtlose Verbindung von mehr als zwei Geräten ohne direkten Sichtkontakt wurde gewünscht. Da musste IrDA passen. Lediglich bei Fernbedienungen ist daher die Infrarotübertragung der Befehle heute noch überwiegende Praxis. In der modernen Gebäudebeleuchtung, wo die Glühlampe zunehmend durch schnelle und sparsame Leuchtdioden-Alternativen ersetzt wird, kommt unter der Li-Fi wieder Bewegung in die breitbandige und störteste optische Nahbereichskommunikation (<https://en.wikipedia.org/wiki/Li-Fi>).

Die Wurzeln von Bluetooth

Im Auftrag des schwedischen Kommunikationsunternehmens Ericsson bestätigte der niederländische Informatikprofessor Jaap Haartsen 1994 durch eine Studie die Machbarkeit des Entwicklungsvorhabens und legte mit dem schwedischen Informatiker Dr. Sven Mattisson alsdann die Grundlagen des Bluetooth-Standards. Mit der Gründung der Bluetooth Special Interest Group (BT SIG) durch die fünf Unternehmen Ericsson, IBM, Intel, Nokia und Toshiba im Jahr 1998 trat Bluetooth seinen weltweiten Siegeszug an – die BT SIG umfasst 33.693 Mitglieder (Stand 6.4.2018)!

Als erste endgültige Spezifikation verabschiedete die BT SIG am 26. Juni 1999 die Bluetoothversion 1.0a. Sie zielte ursprünglich auf die kabellose Anbindung von Headsets (Sprechgarnitur aus Kopfhörer und Mikrofon), Kopfhörern, Lautsprechern, Computertastaturen und -mäusen, Druckern usw. ab. Der Industriestandard IEEE 802.15.1 legt die physikalische Schicht (PHY: Physical Layer) und die Medienzugriffssteuerung (MAC: Media Access Control) zur Konnektivität innerhalb eines drahtlosen privaten lokalen Netzes (WPAN: Wireless Private Local Area Network) mit ortsunveränderlichen, tragbaren und beweglichen Geräten im persönlichen Betriebsumfeld (POS: Personal Operating Space) fest. Unter dem POS wird dabei der Bereich um ein Bluetooth-Endgerät von typisch 20 m Durchmesser verstanden, in dem der Aufbau einer Funkverbindung möglich ist.

Im Laufe der Zeit kam eine Reihe weiterer Bluetooth-Standards zur Anpassung an spezifische Aufgabenstellungen hinzu. So ist z. B. seit Dezember 2009 Bluetooth Low Energy (BLE) als Teil von Bluetooth 4.0 auf geringsten Energieverbrauch für Wearables, Smartwatches, Fitnessarmbänder und Ähnliches optimiert.

Für die Einsatzszenarien des Internet of Things (IoT) und von Industry 4.0 wird das am 6. Dezember 2016 verabschiedete Bluetooth 5.0 eine gewichtige Rolle spielen. Eine umfassende Darstellung der Bluetooth-Standards ist unter https://en.wikipedia.org/wiki/Bluetooth#Bluetooth_1.0_and_1.0B zu finden.

Technische Grundlagen

Die Bluetooth-Kommunikation findet wie bei Geräten nach dem 802.11b- oder 802.11g-Standard (Wi-Fi) im lizenzfreien 2,4-GHz-ISM-Band statt. ISM steht dabei für Industrial Scientific Medical, was die ursprünglich für dieses Band gedachten Anwendungen umreißt. In Deutschland wie in den meisten europäischen Ländern und den USA reicht das 2,4-GHz-ISM-Band von 2,400 GHz bis 2,4835 GHz. In Spanien (2,4450 GHz ... 2,4750 GHz) und Frankreich (2,5565 GHz ... 2,4835 GHz) ist das ISM-Band etwas eingengt.

ISM-Frequenzen sind international zur Nutzung durch Hochfrequenzgeräte zugewiesen. Beispiele sind Funken-Erosionsmaschinen, Mikrowellenherde oder Kurzwellenbestrahlungen in der Medizin. Wie die Bundesnetzagentur unter <http://emf3.bundesnetzagentur.de/pdf/ISM-BNetzA.pdf> beschreibt, können ISM-Frequenzen neben diesen Anwendungen auch für Nachrichtenübertragung genutzt werden. Es heißt wörtlich: „Durch die bei der eigentlichen ISM-Nutzung unvermeidbare Störstrahlung sind die ISM-Frequenzen bei Funkanwendungen in der Nähe von Hochfrequenzgeräten störgefährdet. Funkfrequenzen sind in der modernen Kommunikationswelt aber ein wertvolles Gut, das effizient genutzt werden sollte. Es lag daher der Gedanke nahe, die ISM-Frequenzen für Funkanwendungen vorzusehen, bei denen vorübergehende Störungen ggf. hingenommen werden können und bei denen nur kurze Entfernungen zu überbrücken sind. Idee war, dass Funkgeräte auf ISM-Frequenzen ohne gesonderte Frequenzzuteilung gebührenfrei von jedermann frei nutzbar sind.“

Um unter diesen erschwerten Rahmenbedingungen dennoch eine zuverlässige funkbasierte Kommunikation zu ermöglichen, bedient sich Bluetooth eines speziellen Verfahrens namens Frequency Hopping



Bild 1: Wenn Sender und Empfänger gleichzeitig auf die jeweils gleiche Frequenz springen (frequency hopping), bleibt die Funkverbindung bestehen und ein Störer auf einer stationären Frequenz wirkt sich weniger stark aus.

Spread Spectrum (FHSS = Frequenzsprungverfahren mit gespreiztem Spektrum), bei dem die Trägerfrequenz des Senders von einer Pseudozufallsfolge gesteuert ständig wechselt (Bild 1) und der Empfänger über einen synchron mitlaufenden Pseudozufallsgenerator immer auf die aktuelle Senderfrequenz abgestimmt wird. Zudem wird das Sendesignal „gespreizt“ (Spread Spectrum), wodurch sich die Sendeenergie auf einen größeren Frequenzbereich verteilt. In Verbindung mit den beständigen Trägerfrequenzsprüngen wird dadurch die Robustheit gegenüber schmalbandigen und temporären Störsignalen erhöht. Das liegt daran, dass immer nur für eine kurze Dauer die gleiche Trägerfrequenz verwendet wird. Ist beispielsweise die in einem Zeitschlitz (Time Slot) verwendete Frequenz durch einen anderen Sender gestört, so ist nur ein kleiner Teil der übertragenen Datenfolge davon betroffen. Durch entsprechende Fehlerkorrekturverfahren lässt sich dies erkennen und meist auch korrigieren. Das erneute Aussenden der gestörten Daten wird damit unnötig.

FHSS verwendet 79 Kanäle mit einer Bandbreite von je 1 MHz innerhalb des 2,4-GHz-ISM-Bands, die 1600 mal pro Sekunde gewechselt werden. Ein Zeitschlitz, in dem die Trägerfrequenz konstant ist, dauert demnach 625 μ s. Die Kanalmittenfrequenzen sind $f=(2402+k)$ MHz mit $k= 0 \dots 78$. Unterhalb des niedrigsten Kanals gibt es ein Schutzband mit 2 MHz Bandbreite (Lower-Guard-Band) und oberhalb des höchsten

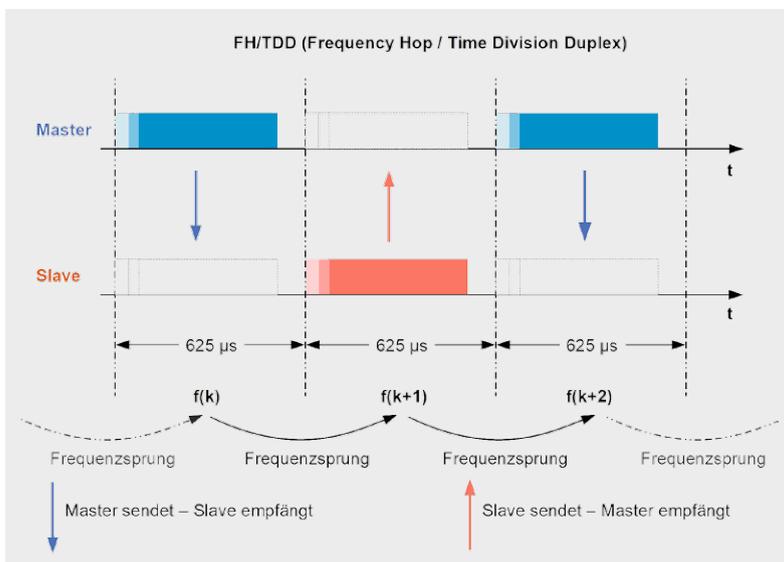


Bild 2: In jedem neuen Zeitschlitz springen die Kommunikationspartner auf die neue Frequenz und tauschen ihre Rollen als Sender und Empfänger. Daher rührt die Bezeichnung des Verfahrens „FH/TDD Frequency Hop/Time-Division Duplex“.

Kanals eines mit 3,5 MHz Bandbreite (Upper-Guard-Band), wodurch das 2,4-GHz-ISM-Band vollständig ausgeschöpft ist.

Man unterscheidet drei Bluetooth-Leistungsklassen, deren Auswahl durch den Hersteller von Bluetoothgeräten bei deren Implementation vom Anwendungsprofil bestimmt wird. Dabei sind die angestrebte Reichweite und die verfügbare Betriebsenergie bestimmende Parameter. Leistungsklasse 1 erlaubt maximale Sendeleistungen von maximal 100 mW für bis zu 150 m Reichweite, Leistungsklasse 2 deckt mit maximal 2,5 mW Reichweiten bis zu 25 m ab und mit maximal 1 mW in der Leistungsklasse 3 lassen sich bis zu 10 m überbrücken.

Die Zuordnung der Zeitschlitze erfolgt nach dem Time-Division-Duplex-Verfahren (FH/TDD Frequency Hop/Time-Division Duplex), bei dem Master und Slave die Sendeberechtigung zyklisch und synchron wechseln. Bild 2 illustriert dies: Im Zeitschlitz k, in dem der Master als Sender und der Slave als Empfänger auf die vom Pseudozufallsgenerator zugewiesene Frequenz $f(k)$ abgestimmt sind, findet die Übertragung eines Datenpakets statt. Im darauf folgenden Zeitschlitz k+1 machen Master und Slave zeitgleich einen Frequenzsprung auf die neue Frequenz $f(k+1)$, der Slave übernimmt die Rolle des Senders und der Master die des Empfängers, im nächsten Zeitschlitz k+2 kehren sich die Verhältnisse wieder um. So wird die Sendeberechtigung bei jedem neuen Zeitschlitz zwischen Master und Slave getauscht und sichergestellt, dass der Datenaustausch stets auf dem gleichen 1-MHz-Kanal stattfindet.

Jeder Master und jeder Slave hat zur eindeutigen Identifizierung eine weltweit einzigartige 48 Bit lange MAC-Adresse (MAC: Media Access Control = Medienzugriffssteuerung). Der Master übermittelt allen aktiven Slaves (bis zu sieben in einem Piconetz) seinen Takt und seine Geräte-ID. Die frequenzmäßige Synchronisierung von Master und Slave beruht darauf, dass deren Pseudozufallsgeneratoren mit dem gleichen Initialwert gestartet werden, der auf der MAC-Adresse des Masters beruht. Dadurch werden Master und Slave nach dem gleichen Frequenzsprungmuster (hopping pattern) abgestimmt und sind somit synchronisiert.

Eine MAC-Adresse im sogenannten kanonischen Format mit sechs Oktetten (8 Bit lange Teilschnitte) in Form von jeweils zwei Hexadezimalziffern, die durch Doppelpunkt (oder Bindestrich) getrennt sind, sieht so aus: 12:34:56:78:9A:BC. Die ersten drei Oktette geben den Gerätehersteller an, dem diese Adressengruppe von der IEEE zugewiesen wurde. So gehört die Herstellerkennung B0:89:00 zur chinesischen Firma Huawei Technologies Co. Ltd., wie man unter <https://regauth.standards.ieee.org/standards-ra-web/pub/view.html#registries> in Erfahrung bringen kann. Die zweite Hälfte der MAC-Adresse dient der Geräteerkennung.

Bluetooth verwendet als Modulationsverfahren GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying = Gausssche Frequenzumtastung). Das bedeutet, dass die zu übertragende Datenbitfolge (Symbolfolge) zunächst einen Gauss-Tiefpassfilter durchläuft und dadurch et-



was verschliffen wird, was ihre spektrale Breite verringert (Pulse Shaping). Wird nun die Trägerfrequenz mit der Gauss-Tiefpass-gefilterten Datenbitfolge moduliert, reduziert dies den Leistungsanteil in den Seitenbändern des HF-Signals (out-of-band spectrum). So werden Interferenzen mit den Nachbarkanälen verringert, allerdings auf Kosten einer stärkeren Überlagerung benachbarter Datensymbole (Intersymbol Interference), was man allerdings nach der Demodulation durch eine Viterbi-Fehlerkorrektur kompensieren kann.

Bluetooth-Vernetzung

Ein elementares Bluetoothnetz (Piconetz) besteht aus maximal 8 aktiven Bluetoothgeräten: einem Master und sieben Slaves. Die Beschränkung auf sieben aktive Slaves folgt daraus, dass Bluetooth für den Medienzugriff lediglich eine 3 Bit große Active Member Address (AMA) verwendet. Wie **Bild 3** zeigt, können durchaus mehr als sieben weitere Bluetoothgeräte Mitglieder in einem Piconetz sein, die dann allerdings nicht aktiv an der Kommunikation teilnehmen. Zum einen sind dies bis zu 255 über eine 8 Bit lange Parked Member Address (PMA) gekennzeichnete, in einem verbindungslosen Parkstatus (P) befindliche Slaves. Weil sie im Parkmodus die Synchronisation aufrechterhalten, sind sie aus diesem kurzfristig, d. h. innerhalb weniger Millisekunden, zu reaktivieren. Weitere Slaves können sich in einem noch stromsparenderen Stand-by-Modus (SB) für eine Kommunikationsanforderung bereithalten. In diesem Zustand erhalten sie keine Adresse. Die maximale Übertragungsrates jeder Master-Slave-Verbindung nimmt mit jedem aktiven Slave wegen der gemeinsamen Nutzung des Frequenzbands (shared medium) ab.

Wenn ein Gerät als Slave an mehreren Piconetzen teilnehmen will, muss es sich wechselweise auf das entsprechende Piconetz synchronisieren, in dem die Kommunikation stattfinden soll. Es wechselt also seine Piconetz-Zugehörigkeit. Die derart genutzten Netze werden in ihrem logischen Zusammenschluss als Scatternetz (Streunetz) bezeichnet. Bevor das gemeinsame Gerät das alte Netz verlässt, informiert es dessen Master darüber, dass es zeitweise von ihm nicht erreichbar ist. Nach der Synchronisation im neuen Netz ist das Gerät dem Master dieses Netzes als neuer Slave bekannt und kann mit ihm Daten austauschen. So kann über einen Slave durch dessen Hin- und Herspringen zwischen Piconetzen eine Kommunikation über Piconetzgrenzen stattfinden. **Bild 4** zeigt ein Scatternetz, das aus zwei Piconetzen besteht. Der mit einem gelben S beschriftete Slave ist der die Piconetze 1 und 2 zu einem Scatternetz verbindende Teilnehmer, indem er entweder mit dem Master von Piconetz 1 oder dem Master von Piconetz 2 kommuniziert.

Ein Bluetoothgerät mit Masterstatus kann diesen auch aufgeben und einem anderen Piconetz als Slave beitreten. Damit wird die Kommunikation in dem verlassenen Piconetz natürlich unterbrochen, bis der Master wieder zurückkehrt.

Audioübertragung mit Bluetooth

Für die drahtlose Übertragung von Audiosignalen via Bluetooth wurden bestimmte Profile entwickelt. Deren herstellerübergreifende Nutzung sichert das Zusammenspiel entsprechend ausgestatteter Geräte. Unter Profil wird dabei der von beiden Kommunikationspartnern gemeinsam verstandene Protokollsatz verstanden, der Voraussetzung für einen funktionierenden Datenaustausch und die Realisierung bestimmter Funktionen ist. Für Bluetooth-Headsets sind z. B. Profile HSP, HFP, A2DP und AVRCP interessant. HSP (Handset Profile) erlaubt die grundlegende Sprachausgabe von einem Handset (z. B. einem Mobiltelefon) über ein Headset. HFP (Hands Free Profile) erweitert HSP um Befehle zur Steuerung eines Autoradios als Freisprecheinrichtung. Sowohl HSP als auch HFP verwenden einfache Mono-Audiocodex entsprechend den relativ niedrigen Anforderungen an die Klangqualität. A2DP (Advanced Audio Distribution Profile) ermöglicht die Stereoübertragung mit deutlich besserer Codierqualität. AVRCP (Audio/Video Remote Control Profile) schließlich versetzt das steuernde Gerät (z. B. Headset) in die

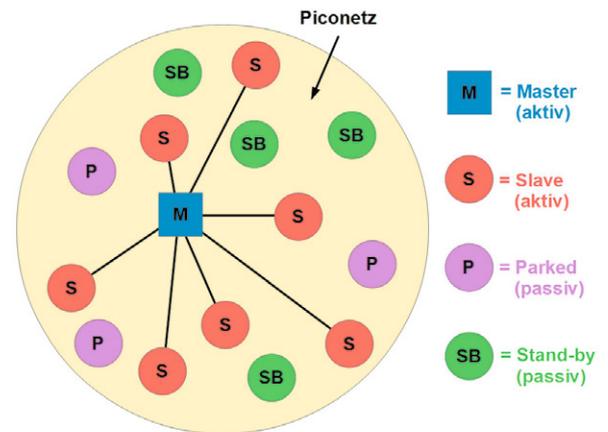


Bild 3: Das Piconetz ist das elementare sternförmige Bluetoothnetz, bestehend aus einem Master, der jeweils mit einem von sieben aktiven Slaves kommuniziert.

Lage, den Zusprieler (z. B. Audioplayer) zu steuern. Damit kann man die Wiedergabe starten oder anhalten, Lautstärke verändern, Titel überspringen oder wiederholen usw. Alle heute verfügbaren Bluetoothprofile zeigt die Übersicht unter <https://de.wikipedia.org/wiki/Bluetooth-Profil>.

Anspruchsvolle Hi-Fi-Enthusiasten stellt der aufwandsarme, wenig Ansprüche an die Rechenleistung stellende und lizenzfreie SBC-Codec (Low Complexity Subband Codec) der Bluetooth SIG nicht zufrieden. Höherwertige, von den Herstellern gegen Lizenzkosten zusätzlich implementierte höherwertige Codecs wie MP3, AAC (Advanced Audio Coding) und aptX erhöhen die Gerätepreise. Verzichtet ein Hersteller aus diesem Grund auf sie, muss die auf dem sendenden Gerät meist in komprimierter Form gespeicherte Musik zuerst dekomprimiert und danach mit dem SBC-Algorithmus erneut für die Bluetooth-Übertragung verlustbehaftet komprimiert werden. Die daraus resultierenden Signalbeeinträchtigungen sind für den Durchschnittshörer meist nicht wahrnehmbar, wohl aber für die geschulten Ohren eines kritischen Audiopuristen. SBC beherrscht Bitraten bis zu 345 kBit/s. Zum Vergleich: Eine unkomprimierte Stereo-Audio-CD erzeugt einen Datenstrom von $44.000 \text{ Samples/s} \times 16 \text{ Bit/Sample} \times 2 \text{ (Kanäle)} = 1.408 \text{ kBit/s}$.

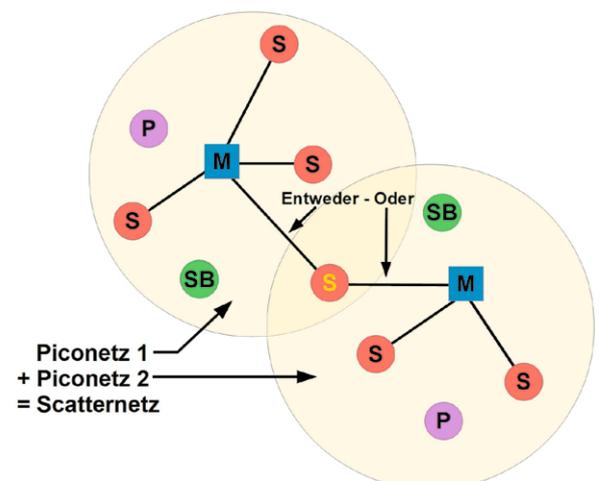


Bild 4: Wenn ein Slave wechselweise seine Zugehörigkeit zu zwei benachbarten Piconetzen ändert, entsteht dadurch ein Scatternetz.



Im Zeichen ständig steigender Prozessleistungen bereitet der Einsatz eines höherwertigen Codierverfahrens anstelle von SBC keine technischen Schwierigkeiten. Deshalb beginnt sich der aptX-Codec für höchstwertige Audioübertragung zu etablieren. Wodurch unterscheidet sich nun aptX von SBC?

Der ursprüngliche aptX-Algorithmus wurde unter der Bezeichnung aptX100 Ende der 1980er-Jahre von Dr. Stephen Smyth im Rahmen seiner Doktorarbeit an der Queen's University Belfast (School of Electronics, Electrical Engineering and Computer Science) entwickelt. Er ist auf ADPCM (Adaptive Differential Pulse Code Modulation) begründet, deren komprimierende Wirkung darauf beruht, dass anstelle jedes vollen realen Abtastwerts eines Zeitsignals nur die deutlich kleinere Differenz zu einem vorhergesagten Signalwert codiert wird. Dies führt bei typischerweise stark autokorrelierten Audiosignalen zu einer erheblichen Einsparung an signalbeschreibenden Bits. Die adaptive Komponente des Verfahrens besteht darin, dass die Höhe der Quantisierungsstufen ebenfalls durch die Vorhersagewerte beeinflusst wird, was zu einer weiteren Steigerung der Codierungseffizienz führt. Mit diesem Kompressionsverfahren wird also die Bitrate eines digitalisierten Audiosignals verringert, allerdings geschieht dies auf Kosten unwiederbringlicher, wenn auch geringer Verluste von Signaldetails (lossy compression). Von psychoakustischen Effekten wie die temporäre und spektrale Maskierung von Tönen macht aptX im Gegensatz zu anderen Verfahren wie MP3 keinen Gebrauch.

Die Rechte an aptX hat heute der Chip-Hersteller Qualcomm. Seine Version von aptX spaltet den gesamten Frequenzbereich in vier Teilbänder auf, welche mit unterschiedlichen Bitraten durch ADPCM (Adaptive Differential Pulse Code Modulation) bitsparend codiert und anschließend durch einen Multiplexer zu einem Gesamtbitstrom zusammengefasst werden.

Standard-aptX wie oben beschrieben wird häufig bei Bluetoothgeräten verwendet, die mit dem A2DP-Profil arbeiten. Meistens sind dies Smartphones, Laptops und Tablets als Quelle und Bluetooth-Kopfhörer und -Lautsprecher als Senke. Dank der Kompressionsrate von 4:1 und dem verwendeten Audioformat 16 Bit/44,1 kHz kommt aptX der Audio-CD-Qualität bereits bei einer Datenrate von bestenfalls 352 kBit/s (bei schwachen Funkverbindungen geht die Bitrate zurück!) recht nah. Für den Begleitton von Filmen ist die von kritischen Zuschauern bemerkte Asynchronität zwischen Bild und Ton (Lippensynchronität) manchmal störend, was den Ausschlag zur Entwicklung latenzärmerer aptX-Versionen gab.

Generell gilt natürlich, dass sowohl Sender als auch Empfänger die gleiche aptX-Variante beherrschen müssen, um die darauf aufsetzende Kommunikation aufbauen zu können. Eine stichwortartige Zusammenfassung der Eigenschaften der aptX-Varianten gibt die [Tabelle 1](#).

Seit August 2015 hat Qualcomm Global Trading Pte. Ltd., eine Tochter des Halbleiterherstellers Qualcomm Incorporated, durch die Übernahme von CSR plc (Cambridge Silicon Radio) die Rechte an aptX erworben. Jeder Hersteller, der ein Bluetoothprodukt

Tabelle 1

aptX	Häufiger Einsatz bei Bluetoothgeräten, welche über A2DP mit einem Empfänger verbunden werden. Dies sind beispielsweise Smartphones und Tablets. Meist ist ein Bluetooth-Kopfhörer oder ein Bluetooth-Lautsprecher der Empfänger
aptX enhanced	Höhere Auflösung für professionelle Radioanwendungen
aptX live	Durch kürzere Latenzzeit besonders für drahtlose Mikrofone geeignet
aptX HD	Erhöhung der Auflösung von 16 auf 24 Bit/Sample bei einer Abtastrate von 48 kHz und einer Bitrate von 576 kBit/s für verbesserten Signal-/Rauschabstand
aptX lossless	Mit einer Samplingrate von 96 kHz und einer Auflösung von 24 Bit extrem hohe Qualität
aptX low latency	Codec mit sehr geringer Latenzzeit (< 40 ms). Das sind ca. 25 % der Standard-Bluetooth-Latenz und damit optimiert für Synchronität von Videobild und Begleitton (Lippensynchronität)

unter Verwendung des Bluetooth-logos in Umlauf bringen möchte, muss dies gemäß dem „Bluetooth SIG Qualification Program“ erfolgreich testen lassen. Mit dem Vorliegen der Lizenz sollte eine weitgehende Interoperabilität mit den entsprechenden Produkten anderer Hersteller gegeben sein.

Die neue Qualcomm-Serie Low Power Bluetooth SoC QCC5100 (SoC: System on a Chip) lässt eine Vielzahl neuer und verbesserter Funktionen für die hochwertige und intelligente drahtlose Audioübertragung erwarten. QCC5100-Zielanwendungen sind Ohrhörer, Kopfhörer, Sprechgarnituren (Headsets), Hearables (intelligente Ohrhörer, auch als smarte Hörhilfen mit Noise Cancellation, Übersetzungsfunktion ...), portable und ortsfeste Lautsprecher (Multiroom), Augmented-Reality-Anwendungen ... Eine Kurzbeschreibung ist hier verfügbar:

<https://www.qualcomm.com/documents/qcc5100-series-product-brief>.

Sicherheit

Bluetooth kennt die drei Sicherheitsmodi 1, 2 und 3.

- Sicherheitsmodus 1 (Non Secure Mode) nutzt außer dem beschriebenen Frequenzsprungverfahren keine weiteren Sicherheitsmechanismen. Eine Authentifizierung der Geräte findet nicht statt.
- Sicherheitsmodus 2 (Service Level Enforced Security) verwendet Sicherheitsmechanismen auf der Ebene der Dienste.
- Sicherheitsmodus 3 (Link Level Enforced Security) löst vor dem Herstellen der physikalischen Verbindung (link) Sicherheitsmaßnahmen aus. Bluetoothgeräte, die im Sicherheitsmodus 3 arbeiten, erfordern für alle Verbindungen zum und vom Gerät Authentifizierung (authentication) und Verschlüsselung (encryption).

Die Charakterisierung der Kommunikationssicherheit wird durch Sicherheitsstufen für Geräte und Dienste ergänzt:

Zwei Gerätesicherheitsstufen (trust levels):

- Vertrauenswürdiges Gerät (trusted device) kann auf alle verfügbaren Dienste des anderen Geräts zugreifen.
- Unsicheres Gerät (untrusted device) darf nur auf vereinbarte Dienste des anderen Geräts zugreifen.

Drei Dienstsicherheitsstufen (service levels):

- Dienstesicherheitsstufe 1 (Service Level 1) die zur Nutzung von Diensten eine Autorisierung und Authentifizierung erfordert. Automatischer Zugriff ist nur bei vertrauenswürdigen Geräten möglich.
- Dienstesicherheitsstufe 2 (Service Level 2) erfordert zum Zugriff auf Anwendungen lediglich eine Authentifizierung.
- Dienstesicherheitsstufe 3 (Service Level 3) bedeutet automatische Zugriffsgewährung für alle Geräte.

Eine aktuelle detaillierte Beschreibung der Bluetooth-Sicherheitskonzepte ist in den Empfehlungen des US-amerikanischen National Institute of Standards and Technology (NIST) mit dem Titel „Guide to



Bild 5: Zwei Bluetooth-Sender-Empfänger aus dem ELV Sortiment (Bestell-Nr. CW-11 46 87 und Bestell-Nr. CW-12 79 31)

Bluetooth Security“ unter <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/legacy/sp/nistspecialpublication800-121r1.pdf> zu finden. Übersichtsartig geht die Veröffentlichung „Bluetooth Security“ das Thema unter <http://www.ece.umd.edu/class/ents650/BluetoothSecurity.pdf> an.

Bluetooth in der Praxis

Um die Audioqualität von aptX praktisch beurteilen zu können, wurden zwei Sender-Empfänger aus dem ELV Katalog einem Gebrauchstest unterzogen:

1. FeinTech „FeinBeam TXXR“ mit eingebautem Lithium-Akku und Bluetoothversion 4.1 (Profil: A2DP, Codecs: aptX Low Latency, aptX, SBC)
2. B-Speech „RTX1“ mit USB-Netzteil und Bluetoothversion 2.1+EDR (Enhanced Data Rate = gesteigerte Datenrate, Profile: A2DP, AVRCP, Codec: SBC).

Beide Geräte (Bild 5) können als Sender (TX: Transmitter) oder Empfänger (RX: Receiver) betrieben werden (Bild 6).

Zum Senden (Betriebsart TX) wird ein analoges leitungsgebundenes Stereosignal in ein hochfrequentes Bluetooth-Funksignal für einen passenden, gepaarten Bluetooth-Empfänger umgewandelt. So kann man beispielsweise Vinylschallplatten von einem klassischen analogen Schallplattenspieler über einen modernen digitalen Receiverbaustein mit Bluetoothfunktion wiedergeben.

Zum Empfangen (Betriebsart RX) wird eine Verbindung zum gewünschten Bluetooth-Sender in der Umgebung durch „Paaren“ hergestellt. Das übertragene Digitalsignal wird in ein analoges Signal gewandelt und dieses z. B. einem drahtgebundenen Kopfhörer oder dem analogen Eingang eines Verstärkers zur Verfügung gestellt.

Mit der Testanordnung gemäß Bild 7 kann man sich von der Verzögerungswirkung der Bluetooth-Über-

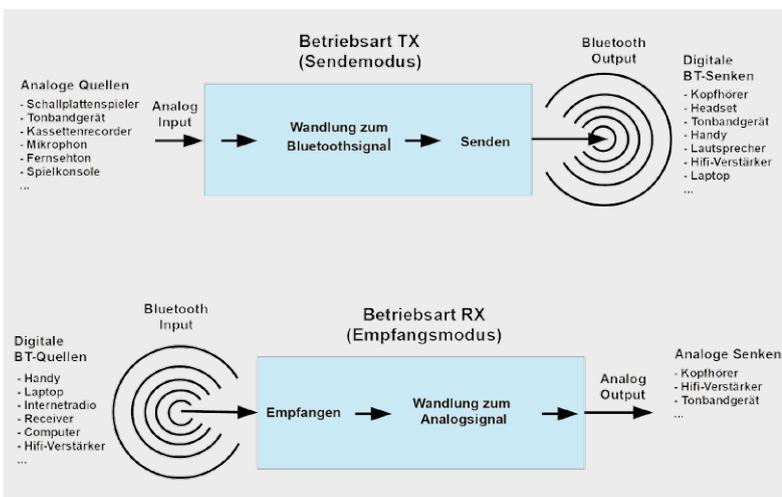


Bild 6: In der Betriebsart „Sender“ wird ein analoges Audio-Eingangssignal in eine Bluetooth-Ausstrahlung gewandelt. In der Betriebsart „Empfänger“ erfolgt die Rückwandlung eines Bluetooth-Funksignals in ein analoges Audio-Ausgangssignal.

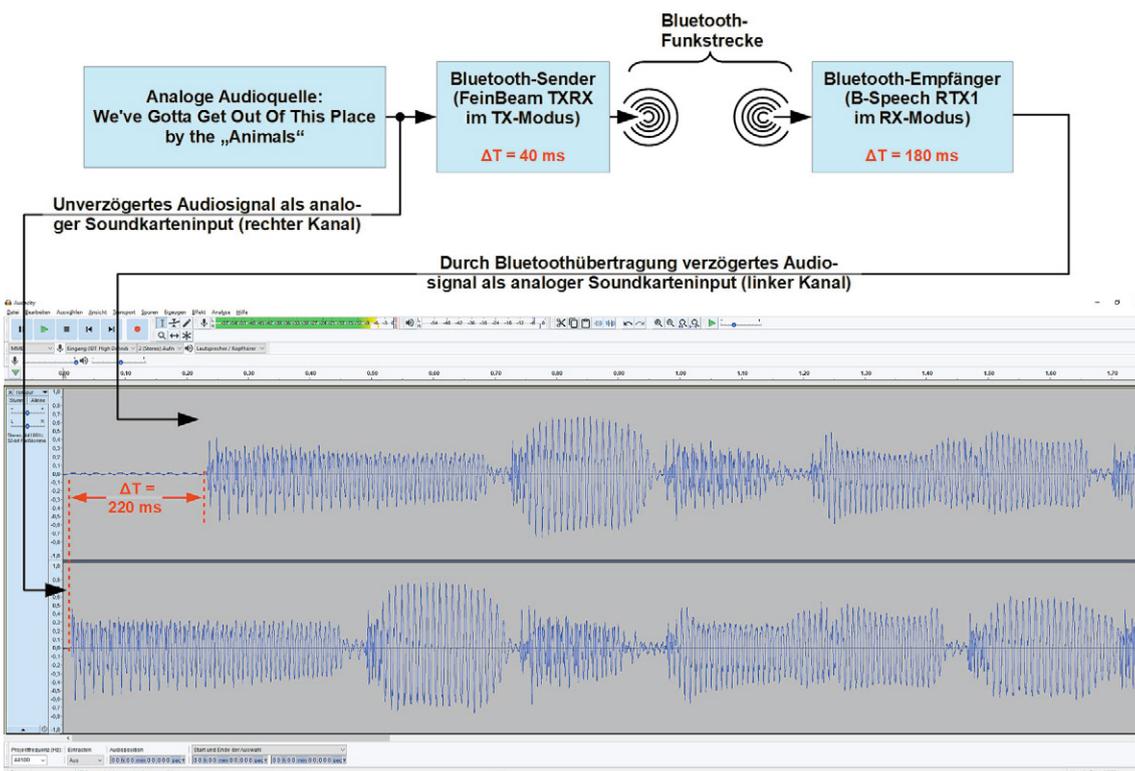


Bild 7: Werden zwei Bluetooth-Sender-Empfänger „Back-to-Back“ betrieben, ergibt sich eine deutliche Verzögerung des übertragenen Quellensignals.



tragung überzeugen. Dazu wird ein analoges Sound-signal (The Animals: We've Got To Get Out Of This Place) auf einen Bluetoothsender (FeinBeam TXRX) gegeben. Dessen Sendesignal wird von einem Bluetooth-Empfänger (B-Speech RTX1) empfangen und in ein analoges Signal zurückgewandelt, welches über den linken Analogeingang einer Soundkarte von Audacity aufgezeichnet wird. Das unverzögerte Original-Analogsignal zeichnet Audacity über den rechten Soundkarteneingang auf. Man erkennt eine Gesamtverzögerung von ca. 220 ms, zu der der FeinBeam-Sender mit aptX-Low-Latency-Codec etwa 40 ms beitragen dürfte. Der B-Speech-Empfänger mit Standard-SBC-Codec ist somit für die verbleibende Laufzeit von 180 ms verantwortlich. Für das lineare Streamen von Musik oder Hörspielen spielt ein solcher Zeitversatz (Latenz) keine Rolle. Mehr oder weniger störend tritt er jedoch bei jeder Form der interaktiven Kommunikation (wie z. B. bei einem Telefongespräch) in Erscheinung.

Bei unkritischem Audiomaterial wird der Durchschnittshörer keinen Unterschied zwischen Original-

und BT-Signal hören. Auch in deren Zeitdarstellung durch Audacity (Bild 7) sind die Differenzen marginal. Ermittelt man hingegen mit Audacity das Spektrum eines 1-kHz-Sinussignals vor und nach dem Durchlaufen der Bluetooth-Übertragungskette, manifestiert sich deren Auswirkung deutlicher. Aus dem vormals ausgeprägt vorhandenen Harmonischen ist ein nahezu lückenloser Frequenzteppich geworden (Bild 8). Es sind also Frequenzanteile hinzugekommen, die der geübte Hörer als Verfälschungen des Klangbilds hochwertiger Aufnahmen zu erkennen vermag.

Zusammenfassung

Bluetooth hat sich als universeller Standard zur drahtlosen Verbindung digitaler Endgeräte im Nahbereich etabliert. Dafür müssen die Kommunikationspartner mit den gleichen Profilen (protocol subsets) ausgestattet sein. Die Anwendungsvielfalt von Bluetooth geht weit über die Übertragung von Audioinhalten hinaus. Im aufkommenden Zeitalter des drahtlosen „Internet of Things (IoT)“ wird Bluetooth Low Energy und Bluetooth 5.0 im Nahbereich und in Verbindung mit LoRaWAN-Funktechnik (**Long Range Wide Area Network**) für größere Gebiete eine immer stärkere Rolle spielen. Dabei ist ein an die Anwendung angepasstes Sicherheitsmanagement unverzichtbar, um Missbrauch zu vermeiden. Nur so wird Vertrauen und Akzeptanz in der Gesellschaft entstehen können.

ELV

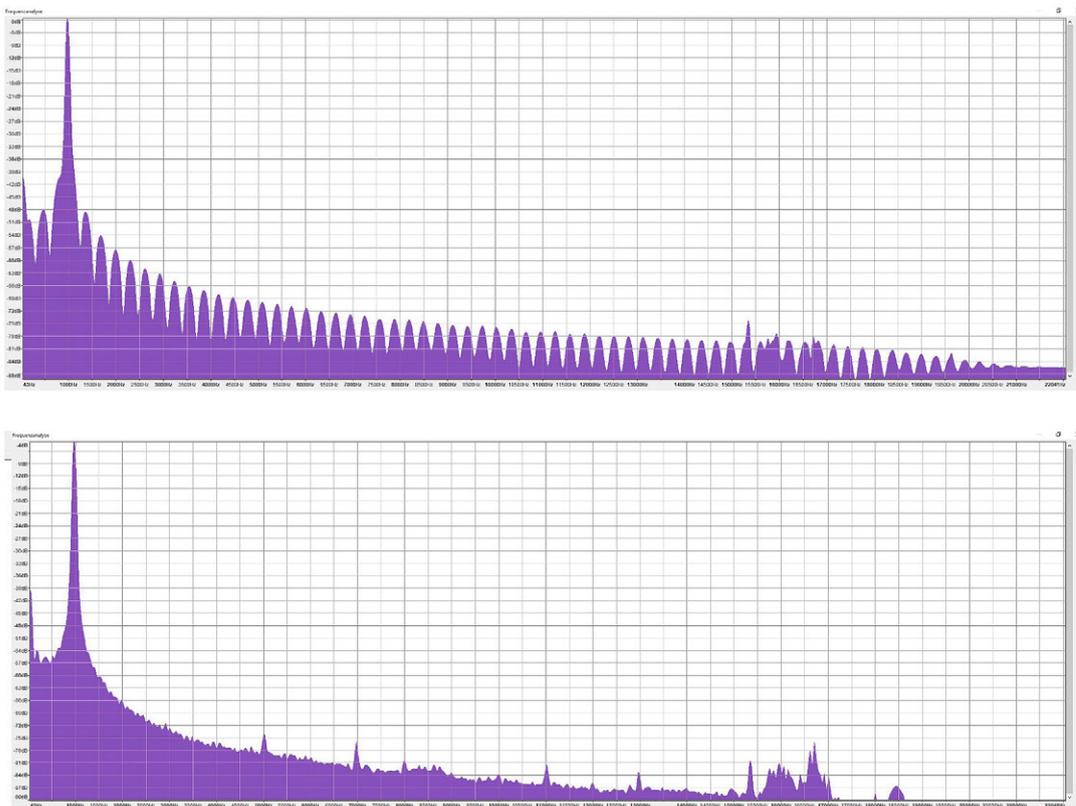


Bild 8: Was für viele Ohren kaum hörbar ist, zeigt sich im Signalspektrum als deutliche Verformung des Quellensignals.

Wie Bluetooth zu seinem Namen kam

Die Forschungsarbeiten an Bluetooth starteten zunächst unter dem Namen „Multi-Communicator Link“. Der endgültige Name Bluetooth ist eine Anspielung auf den dänischen Wikingerkönig Harald Gormsen mit dem Beinamen Blatand (Blatand = Blauzahn = Bluetooth), der im 10. Jahrhundert Dänemark und Norwegen gewaltfrei vereinigte. Den Überlieferungen zufolge, soll er die große Fähigkeit besessen haben, Menschen durch die Kraft des Worts und der Überzeugung zusammen-

zuführen. Jim Kardach, einer der Gründer der BT SIG hielt diese Eigenschaft als charakteristisch für das Entwicklungsziel der harmonischen, drahtlosen Kommunikation eines PCs mit seinen peripheren Geräten. So vereint das Bluetoothsymbol die Runen für die Lautwerte der Initialen H und B von Harald Blauzahn, wie oben rechts dargestellt. Unter https://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1269737 berichtet Jim Kardach über die näheren Umstände bei der Namensfindung.

