

Bluetooth - die Funkalternative zur Verkabelung

1. Wie sendet Bluetooth?

Sobald das Gerät aktiviert wird, sendet es Suchsignale aus. Nachdem eine solche Anfrage von anderen in Reichweite befindlichen Teilnehmern beantwortet worden ist, tauschen die beiden Systeme ihre Adressinformationen aus. Zu Beginn der Kommunikation zwischen den beiden Komponenten kann der Anwender sich durch Eingabe einer PIN (Personal Identification Number) legitimieren und die Verbindung freigeben.

Mehr als zwei Bluetooth-Systeme können ein kleines Netzwerk bilden. Ein solches Piconet besteht aus maximal 256 Teilnehmern, von denen immer einer als Master und alle anderen als Slave arbeiten. Von den 256 Teilnehmern können max. acht gleichzeitig aktiv sein (ein Master und sieben Slaves). Alle Geräte unterhalten eine logische Verbindung untereinander, die nur im Falle der tatsächlichen Datenübertragung in eine aktive Verbindung überführt wird. Bis zu sieben Slaves können dabei in einem Piconet aktiv sein, die anderen sind währenddessen in einem sogenannten Park-Modus im Piconet eingebucht. Diese parkenden Slaves senden von sich aus keine Daten, synchronisieren sich aber laufend mit dem Master und werden von diesem aus dem Park-Modus in den regulären Kommunikationsstatus zurückgeholt. Mehrere Piconets mit sich überlappenden Bereichen werden als Scatternet bezeichnet. In jedem Piconet gibt es nur einen Master, die Slaves können aber in mehreren Netzen gleichzeitig eingebucht sein.

Bluetooth arbeitet mit einer Frequenz zwischen 2,400 und 2,4835 GHz, dem ISM-Band (Industrial, Scientific, Medical), das weltweit frei und unlizenziiert zur Verfügung steht.

Dabei wird ein Fast Frequency Hopping Verfahren eingesetzt, bei dem 1600 Frequenzwechsel pro Sekunde vollzogen werden, um eine große Störfestigkeit gegenüber anderen Einstrahlungen im umfangreich genutzten ISM-Band zu gewährleisten.

Der Bluetooth Sender arbeitet im Frequenzbereich von 2,400 und 2,4835 GHz nach dem Frequenzsprungverfahren (Frequency Hopping) und verwendet dabei 1600 Frequenzsprünge (Hops) in der Sekunde. Dabei wird zwischen 79 Frequenzen mit einer Bandbreite von jeweils einem Megahertz hin- und hergesprungen. Als Modulation wird GFSK (Gauss Frequency Shift Keying) verwendet. Mit diesem Verfahren werden Interferenzen und Störungen (auch Mikrowellengeräte und andere ISM-Einrichtungen arbeiten bei ca. 2,45 GHz) vermieden. Bei jedem Sprung wird ein Datenpaket mit einem MBit/s (einschließlich Daten und Steuersignale) übertragen. Die Bluetooth Geräte werden durch eine 3Bit MAC Adresse eindeutig unterschieden. Zusätzlich werden die Daten mit einem 64 bis 128 Bit langen Schlüssel während der Übertragung kodiert.

2. Sendeleistung

Der Bluetooth-Standard sieht vor, dass die Sendeleistung maximal nur den jeweils erforderlichen Wert annehmen soll. Verbessert sich die Empfangsqualität (i.d.R. mit Verringerung der Entfernung zwischen Sender und Empfänger), wird weniger Sendeleistung benötigt. Die Sendeleistung wird reduziert, der Stromverbrauch und die elektromagnetische Emission sinken. Dieser Modus muss in einem Bluetooth Modul der Klasse 2 oder 3 nicht realisiert sein, er kann jedoch entsprechend des Standards realisiert werden.

Um die begrenzten Energiereserven in mobilen Endgeräten wie Mobiltelefonen oder PDAs zu schonen, wird in den meisten Fällen die Klasse 3 Variante mit 0 dBm = 0,001 Watt = 1mW verwendet.

Der Stromsparmmodus kann für Geräte im Piconet verwendet werden, wenn keine Daten gesendet werden. Der Master im Piconet kann ein Slave Gerät in den HOLD Modus versetzen, in diesem Zustand läuft dann nur eine interne Timer-Funktion im Slavegerät. Auch Slave Geräte können beim Master anfordern, in den HOLD Modus versetzt zu werden. Der Datentransfer wird automatisch neu gestartet, sobald die Geräte aus dem HOLD Modus erwachen. Der HOLD Modus wird verwendet, wenn mehrere Piconetze verbunden sind oder wenn z.B. Endgeräte, die wenig Energie verbrauchen sollen, wie Temperatursensoren oder ähnliche angeschlossen sind.

Zwei weitere Stromsparmodi sind verfügbar. Der sog. SNIFF und der PARK Modus. Im SNIFF Modus fragt das Slave Gerät im Piconet mit einer geringeren Häufigkeit (zwischen 0,6 ms und 40,9 s) nach, ob ein anderes Gerät mit ihm kommunizieren möchte. Der SNIFF Intervall ist programmierbar und hängt von der jeweiligen Applikation ab. Im PARK Modus wird das SLAVE Gerät weiterhin im Piconet synchronisiert, nimmt jedoch nicht am aktiven Datenaustausch teil. Das Slave-Gerät gibt seine MAC Adresse ab und hört nur noch zyklisch den Datenstrom ab, um zu resynchronisieren oder um Nachrichten vom Master zu erhalten.

Wenn wir uns die Liste der Stromsparfunktionen anschauen und nach Energieverbrauch sortieren, erkennen wir, dass der SNIFF Modus die höchste Aktivität hat, gefolgt vom HOLD Modus mit niedrigerer Aktivität und abschließend der PARK Modus mit der niedrigsten Aktivität.

Bevor eine Verbindung im Piconet aufgebaut wird, befinden sich alle Geräte im "Standby" Modus. In diesem Modus überwacht das Endgerät passiv alle 1,28 Sekunden den Bluetooth Frequenzbereich, d. h. den gesamten ISM Frequenzbereich von 2,402 bis 2,480 GHz. Jedes Mal wenn ein Funkmodul aus dem Schlafmodus aufwacht, überwacht es eine Liste von 32 für dieses Gerät definierten hop-Frequenzen.

Aktivitätsmodus und Sendeleistung:

- Park Modus: keine Ausstrahlung, nur Abhören
- Hold Modus: keine Ausstrahlung, nur Abhören (mit MAC Adresse)
- Sniff Modus: Ausstrahlung mit geringer Häufigkeit, abhängig von der Anwendung (Pausenzeiten zwischen 0,6 ms und 40,9 s)

Als Zugriffs- und Duplexverfahren wird FHMA/TDD (Frequency Hopping Multiple Access / Time Division Duplex) verwendet; eine Technik, die das Zeitschlitzverfahren, wie es von den digitalen GSM-Mobilfunknetzen bekannt ist, mit einem Frequenzsprungverfahren kombiniert. Dabei wird jeder Zeitschlitz mit einem Megahertz Bandbreite und einer Dauer von 0,625 ms auf jeweils einer anderen der 79 Sprungfrequenzen innerhalb des Bluetooth-Bandes ausgesendet. Als Resultat ergeben sich bei Bluetooth 1.600 Frequenzsprünge pro Sekunde (hops/s) innerhalb des ISM-Bandes.

3. Sendeleistung und Grenzwerte

Die Sendeleistung beträgt je nach Klasse zwischen einem mW bis zu 100 mW. Bei Bluetooth wird auf unterschiedlichen Frequenzen im ISM-Band, jedoch in ununterbrochener Reihenfolge Sendeleistung abgestrahlt. Berücksichtigt man, dass die Kanalschaltzeit zum Sprung in den nächsten Frequenzbereich 0,220 ms dauert, so wird die Sendeleistung während nur 0,405 ms (0,625 ms minus 0,220 ms) und das 1600 mal während einer Sekunde abgestrahlt.

Die Spitzensendeleistung sollte daher mit dem Faktor 0,65 (0,405 geteilt durch 0,625) auf die mittlere Sendeleistung umgerechnet werden. Die angegebene Sendeleistung bezieht sich auf den isotropen Kugelstrahler (EIRP), d.h. ohne Richtwirkung. Bei einer Richtwirkung müsste die Leistung entsprechend reduziert werden, um die durch die Norm vorgegebene Leistungsdichte nicht zu überschreiten.

Der Grenzwert der Leistungsflussdichte entsprechend der 26.BISchV (Bundesimmissionsschutzverordnung) beträgt bei einer Frequenz von 2,4 GHz entsprechend der Tabelle 10 W/m². Die rechnerische Bestimmung der Leistungsflussdichte im Fernfeld eines Bluetooth Strahlers ergibt folgende Werte, wobei das Fernfeld bei einer Frequenz von 2,4 GHz nach ca. 30 Zentimetern beginnt:

Die Leistungsflussdichte im Fernfeld errechnet sich nach der Formel: Strahlungsleistung am Sendeort geteilt durch $4 \cdot \pi \cdot r^2$ ($4 \cdot \pi \cdot r^2$ ist die Kugeloberfläche, wobei "r" der Abstand der Strahlungsquelle zum Empfangsort ist).

Tabelle 1: Das „Brücken-Beispiel“ zur Verdeutlichung der Sendeleistung von Bluetooth

Sendeleistung in mW	gemittelter Wert	Abstand in m	Grenzwert in W/m ²	Leistungsflussdichte in w/m ²	Brückentragfähigkeit in Tonnen	Brückenbelastung in kg
0,5	0,325	0,1	10	0,002586	100 t	25,86 kg
1	0,65	0,1	10	0,005173	100 t	51,73 kg
2,5	1,625	0,1	10	0,012932	100 t	129,32 kg
10	6,5	0,1	10	0,051727	100 t	517,27 kg
100	65	0,1	10	0,517269	100 t	5172,69 kg
0,5	0,325	0,5	10	0,000103	100 t	1,03 kg
1	0,65	0,5	10	0,000207	100 t	2,07 kg
2,5	1,625	0,5	10	0,000517	100 t	5,17 kg
10	6,5	0,5	10	0,002069	100 t	20,69 kg
100	65	0,5	10	0,020691	100 t	206,91 kg
0,5	0,325	1	10	0,000026	100 t	0,26 kg
1	0,65	1	10	0,000052	100 t	0,52 kg
2,5	1,625	1	10	0,000129	100 t	1,29 kg
10	6,5	1	10	0,000517	100 t	5,17 kg
100	65	1	10	0,005173	100 t	51,73 kg
2,5	1,625	2	10	0,000032	100 t	0,32 kg
2,5	1,625	3	10	0,000014	100 t	0,14 kg

Beispiele aus der obigen Tabelle:

2,5 mW Sendeleistung und ein Abstand von 0,5 m zum Bluetooth Sender ergibt eine Leistungsflussdichte von 0,000517 W/m², diese Relation auf die 100 t Brücke angewendet ergibt eine Brückenbelastung von 5,17 kg, dem Gewicht eines 1jährigen Kindes.

1 mW Sendeleistung und ein Abstand von 1 m zum Bluetooth Sender ergibt eine Leistungsflussdichte von 0,000052 W/m², diese Relation wieder auf die 100 t Brücke angewendet ergibt eine Brückenbelastung von 0,52 kg, dem Gewicht eines Meerschweinchens.

Damit sind die Sendeleistungen bei Bluetooth wirklich weit unterhalb des Grenzwertes von 10 W/m².

Da Bluetooth im Ruhebetrieb nicht sendet, findet eine Aussendung nur während der aktiven Datenübertragungszeit statt. Die Dauer der Datenübertragung ist auf den Arbeitstag bezogen verhältnismäßig kurz.

Da in geschlossenen Räumen die Wellenausbreitung durch Reflexionen gestört wird und die elektromagnetischen Wellen sich nicht in der Unendlichkeit des Raums verlaufen können, sondern reflektiert und absorbiert werden, sollte man in kleineren Räumen bei Berechnungen Entfernungswerte von 1 bis 2 Meter verwenden.