



White Paper

Welches Datenfunk-Protokoll passt zu meiner Anwendung?

802.15.4 basierte Funkstandards im Vergleich

Verfasser

Georg Bauerfeind

dresden elektronik ingenieurtechnik gmbh

Juli 2012



Abstract

Mittlerweile haben sich auf Basis von 802.15.4 eine Reihe von Protokollen für die drahtlose Übertragung von Daten und den Aufbau von Netzwerken etabliert. Zu den wichtigsten zählen 802.15.4 MAC, 6LoWPAN, ZigBee PRO und RF4CE. Diese unterscheiden sich nicht nur im Aufbau der Netzwerkstruktur, sondern auch in ihrer Leistungsfähigkeit. In Abhängigkeit von jeweiligen Erfordernissen durch den konkreten Anwendungsfall muss der Entwickler das dafür passende Protokoll auswählen. Das Protokoll bestimmt nicht nur Aufbau des Netzwerks und Leistungsfähigkeit sondern auch den Entwicklungsaufwand.

Dieses Dokument gibt einen Überblick über die wichtigsten 802.15.4 basierten Protokolle und vergleicht diese hinsichtlich ihrer wichtigsten Features und Ihrer typischen Anwendungsgebiete. Dies hilft dem Leser dabei, das passende Protokoll für seine Anwendung auszuwählen.



Glossar

Das Glossar gibt einen Überblick über in diesem White Paper verwendete Begriffe und Definitionen.

| Begriff | Beschreibung |
|----------|--|
| 802.15.4 | IEEE 802.15.4 Standard, geltend für: low-rate wireless Personal Area Network (WPAN) |
| 6LoWPAN | IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks |
| Hop | Zwischenknoten einer Route sowie Weg von einem Netzknoten zum nächsten |
| IETF | Internet Engineering Task Force |
| IPSO | Internet Protocol for Smart Objects (Alliance) |
| IPv6 | Internet Protocol Version 6, Version des Internet Protokolls (IP) bestimmt zur Nachfolge des IPv4, derzeit meist benutztes Protokoll zur Steuerung fast allen Internet-Verkehrs. |
| MAC | Medium Access Control ... Schicht, Adresse etc. |
| MPDU | MAC Protocol Data Unit |
| MTU | Maximum Transmission Unit |
| NWK | Network |
| OSI | Open Systems Interconnection (OSI) Modell, Schichtenmodell als Designgrundlage von Kommunikationsprotokollen in Rechnernetzwerken. |
| PAN | Personal Area Network |
| PHY | OSI-Modell Schicht 1: Die Bitübertragungsschicht definiert elektrische und physikalische Geräte-Spezifikationen. Sie definiert den Zusammenhang zwischen Gerät und Übertragungsmedium sowie Aufbau aller Hardware-Komponenten. |
| RPL | Routing Protocol for low power and Lossy networks |
| ROLL | Routing Over Low power and Lossy networks |
| UDP | User Datagram Protocol |
| uIP | Micro IP stack |
| MPDU | MAC Protocol Data Unit |
| WSN | Wireless Sensor Network |
| ZigBee | Low-cost, low-power Funknetz-Standard. Die ZigBee Alliance ist ein Zusammenschluss von Unternehmen, die die weltweite Entwicklung dieser Technologie vorantreiben. |



802.15.4 MAC

Unter allen vorgestellten Protokollen handelt es sich hierbei um die einfachste Ausführung. Alle anderen, also 6LoWPAN, ZigBee und RF4CE, nutzen 802.15.4 MAC als darunter liegende Protokollschicht (siehe **Abbildung 1**). Die unterste Schicht (engl.: layer; PHY = Bitübertragungsschicht) ist ebenso wie die MAC-Schicht bei allen Protokollen die gleiche. Hier wird lediglich definiert, in welcher Art und Weise die Daten übermittelt werden. Beispielsweise wird vereinbart welche Frequenzen, Modulierungs- und Codierungsarten genutzt werden. Die folgende Abbildung stellt den Aufbau der unterschiedlichen Protokollschichten gemäß OSI-Modell gegenüber:

| OSI-Schicht | 802.15.4 MAC | 6LoWPAN | ZigBee | RF4CE |
|----------------|--------------------|--------------------------|---|---|
| Anwendung | Benutzer-definiert | Benutzer-definiert | Standardisierte und benutzerdefinierte ZigBee Profile | Öffentliches oder proprietäres Anwendungsprofil |
| Darstellung | | | | |
| Sitzung | | | | |
| Transport | | z.B. UDP | | |
| Vermittlung | | IPv6 ----- 6LoWPAN | ZigBee NWK Layer | ZigBee RF4CE NWK Layer |
| Sicherung | 802.15.4 MAC | | | |
| Bitübertragung | 802.15.4 PHY | | | |

Abbildung 1: Einordnung der unterschiedlichen Protokolle im OSI-Modell

Höher liegende Schichten, wie z.B. die Vermittlungsschicht, sind für die Organisation des Netzwerks zuständig. Diese sind von Protokoll zu Protokoll unterschiedlich, bzw. nicht vorhanden. Dementsprechend unterschiedlich sind Netzwerkaufbau und Komplexität. Wie man der oben stehenden Abbildung zusätzlich entnehmen kann, bauen alle anderen Protokolle auf dem 802.15.4 MAC auf. Dieser wird sowohl sprachlich und auch gedanklich als Synonym für die Bitübertragungs- und Sicherungsschicht genutzt.

Weil dem MAC eine richtige Netzwerk-Schicht fehlt, bietet er nur sehr grundlegende Funktionen, hat aber dadurch eine Reihe von Vorteilen. Beispielsweise ist der Speicherbedarf sehr gering: Dies erlaubt den Einsatz von preiswerten 8-Bit Controllern mit geringer Flashgröße (32 bis 128 kB). Werden hohe Stückzahlen angestrebt, ergibt sich ein Kostenvorteil durch geringe Bauteilkosten. Außerdem lässt er dem Entwickler einen weiten Spielraum hinsichtlich der Implementierung von eigenen Protokollen. Je nach Komplexität der Anwendung können bei entsprechender Implementierung sehr kurze Einschaltzeiten (bzw. lange Stand-by-Zeiten) der Knoten realisiert werden. Damit lässt sich der Strombedarf auf ein Minimum reduzieren. Dies prädestiniert den reinen MAC-Layer für Energy-



Harvesting-Anwendungen sowie für Geräte, bei denen ein sehr langer Batterie-Wechsel-Zyklus erreicht werden soll. Weiterhin können, aufbauend auf proprietären Protokollerweiterungen des MAC-Layers, weitaus höhere Datenraten erreicht werden, als z.B. mit ZigBee oder 6LoWPAN. Die minimalistische Architektur des 802.15.4 trägt außerdem dazu bei, dass sich sehr niedrige Netzwerk-Latenzen erreichen lassen. Dies ist natürlich nur dann möglich, wenn die Knoten, zwischen denen die Latenz gemessen wird, nicht schlafen und die Datenübertragung nicht über mehrere Hops erfolgt.

Die Implementierung basierend auf dem MAC-Layer stellt den Entwickler u.U. vor einige Hürden, die es zu bedenken gilt. Zum Beispiel ist kein Routing vorgesehen. Erfordert die Anwendung also die Herausbildung einer Netzwerkstruktur, die über statische Adressierung hinausgeht, so müssen evtl. Routing-Schemen „von Hand“ implementiert werden. Für kleinere Netzwerke <10 Knoten ist das noch überschaubar, kann jedoch mit steigender Komplexität einen hohen Implementierungs- und Testaufwand bedeuten. Aus diesem Grund ist der MAC-Layer besonders gut für Verbindungstypen geeignet, die kein Routing erfordern, also z.B. Stern-Topologien oder Punkt-zu-Punkt-Verbindungen. Besonders einfach aufgebaute Funknetzwerke können Peer-to-Peer Verbindungen nutzen, zu welchen kein Koordinator erforderlich ist. Die Knoten können sich dann z.B. direkt adressieren oder Broadcast-Telegramme senden.

Implementierungen

Faktisch alle Hersteller von 802.15.4 Transceivern bieten zu ihren Chips entsprechende 802.15.4-MAC-Software an (z.B. IEEE 802.15.4 MAC von Atmel). Eine Ausnahme stellt hier ZMDi dar: Hier ist der MAC in die Hardware der Transceiver integriert.

Bevorzuge Anwendungsgebiete

- Eignet sich für besonders für einfache Punkt-zu-Punkt Verbindungen („Drahtersatz“)
- Implementierung proprietärer Protokollschichten
- In extrem Ressourcen-beschränkten Systemen, z.B. bei Energy Harvesting Lösungen oder sehr langen Batteriewechselintervallen

6LoWPAN

6LoWPAN ist ein Akronym für IPv6 over Low Power Wireless Personal Area Networks (engl.: IPv6 für drahtlose persönliche Netzwerke mit niedrigem Energieverbrauch). 6LoWPAN ist der Name der Arbeitsgruppe der IETF, die für diesen Standard zuständig ist und wird gleichzeitig synonym für das oben genannte Kommunikationsprotokoll verwendet. Obwohl 6LoWPAN gemeinhin zu den Protokollen gezählt wird, handelt es sich genau genommen nur um eine Anpassungsschicht (engl.: Adaption Layer), das eigentliche Netzwerkprotokoll dass zum Einsatz kommt heißt IPv6. 6LoWPAN bietet damit eine elegante Möglichkeit, IPv6 auf 802.15.4-basierten Knoten zum Einsatz zu bringen. Die Idee hinter diesem Ansatz ist es, eine Möglichkeit zu schaffen Sensornetzwerke die bereits bestehende IP-

Infrastruktur einzugliedern. Dies ist zwar mit anderen Protokollen z.B. ZigBee auch möglich, jedoch entfällt bei 6LoWPAN der Aufwand von Gateways, die für die Protokollumsetzung Sorge tragen.

Der Standard 6LoWPAN umfasst unter anderem Header-Kompressionsverfahren, die es möglich machen, IPv6-Pakete über IEEE 802.15.4-basierende Netzwerke zu übertragen, ohne den vollständigen IPv6-Header übermitteln zu müssen. Die Funktionsweise dieser Verfahren beruht darauf, dass bestimmte Informationen des IP-Headers aus dem darunter liegendem 802.15.4-MAC-Layer gewonnen werden können. 6LoWPAN verfolgt das Ziel, drahtlose PANs mit möglichst geringem Aufwand in bestehende Netze integrieren zu können. Einen typischen Aufbau eines 6LoWPAN Netzes zeigt folgende Abbildung:

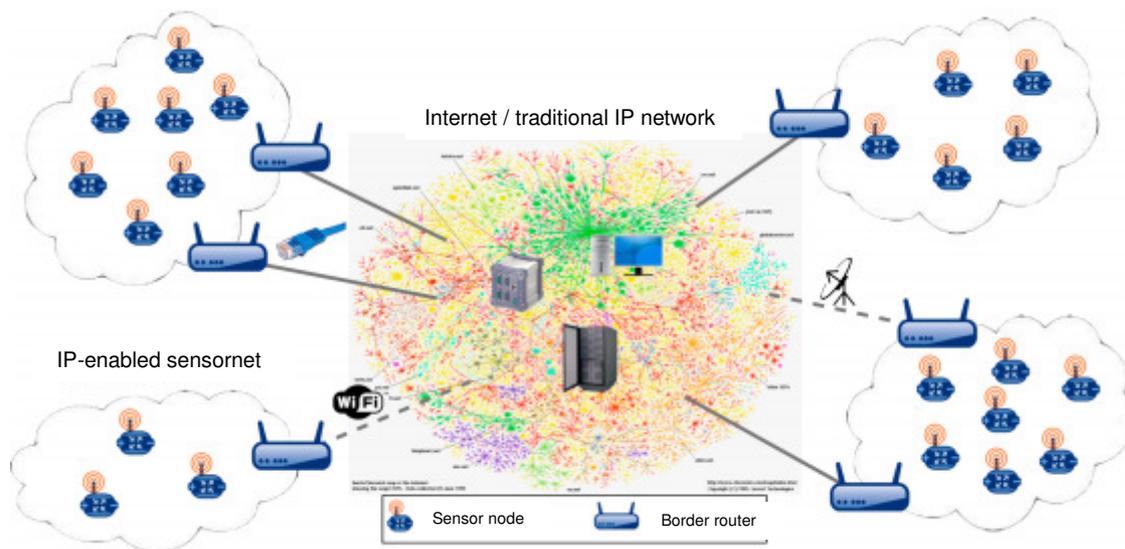


Abbildung 2: Mehrere WSNs durch Border-Router mit Internet bzw. IP-Infrastruktur verbunden
(Quelle: IPSO Alliance [1])

Charakteristisch sind hierbei die Border-Router, die als 6LoWPAN-Gateway fungieren, und die WSNs mit der globalen IP-Infrastruktur verbinden.

6LoWPAN führt ein Fragmentierungsschema ein, da die maximale Größe der MPDU von 802.15.4 nur 127 Bytes beträgt. Dies entspricht weniger als 10% der sogenannten Maximum Transmission Unit (MTU) eines IPv6-Frames. Soll also ein Datenpaket übertragen werden, das größer ist als die 127 zulässigen Bytes, wird dieser Mechanismus genutzt, um die Aufteilung der Daten auf mehrere einzelne Pakete vorzunehmen.

Neben der Fragmentierung ist die Header-Kompression ein wichtiges Element von 6LoWPAN: Dadurch wird der Protokoll-Overhead teilweise sehr stark verringert. Der IPv6-Header hat eine feste Länge von 40 Bytes. Zusammen mit dem kleinstmöglichen 802.15.4-Header würde sich also ein Mindest-Overhead von 45 Bytes ergeben, dies entspricht rund 35% der maximal möglichen Framelänge von 802.15.4. In **Abbildung 3** ist die Länge der Header in Abhängigkeit vom adressierten Netzwerksegment dargestellt. Es ergibt sich für den mit Hilfe von 6LoWPAN komprimierten Header eine Länge zwischen 7 und 31 Bytes.

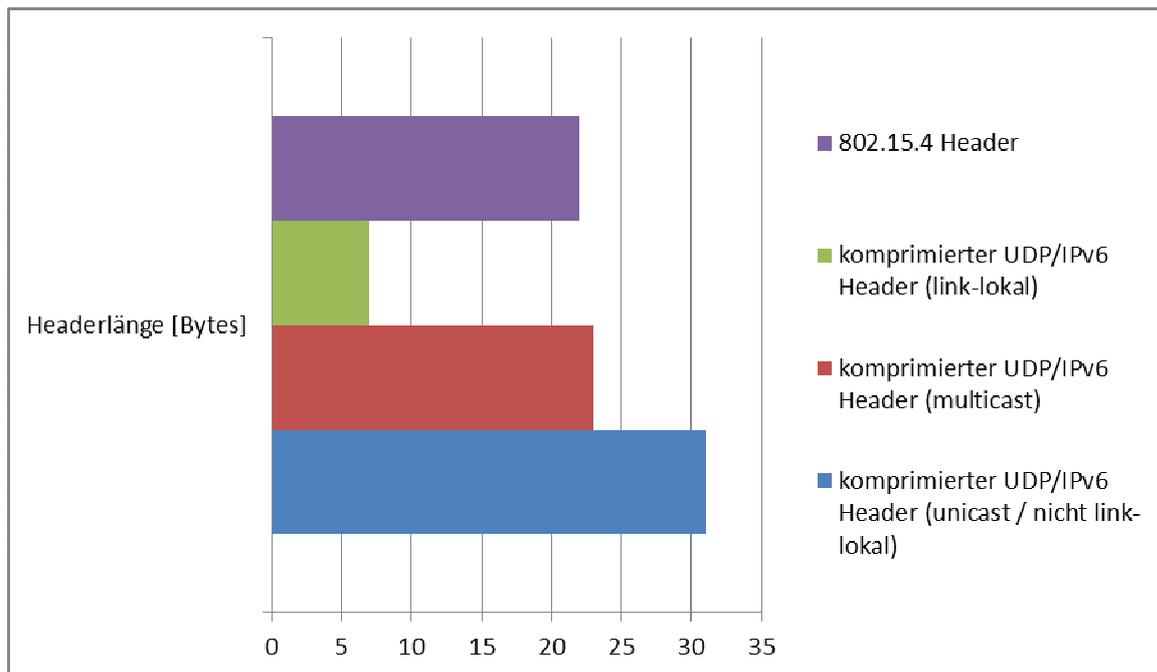


Abbildung 3: Header-Aufbau von 802.15.4 und 6LoWPAN

Die Knoten im WSN benutzen einen vollständigen IPv6-Stack, jedoch wird der durch die Verwendung von IPv6 entstehende Overhead durch die Anwendung der Headerkompression verringert. Für den Einsatz auf ressourcenbeschränkten Geräten (z.B. 8-Bit Mikrocontroller) kommen besonders kompakte Stacks zum Einsatz wie z.B. uIP. Daraus ergibt sich, dass bei der Nutzung von 6LoWPAN Protokolle wie z.B. UDP eingesetzt werden können. 6LoWPAN lässt damit auch die Implementierung höher liegender Schichten (des OSI-Referenzmodells) bis hin zur Anwendungsschicht offen.

Zur Organisation des Netzwerkes existieren unterschiedliche Ansätze wie z.B. Route Over oder Mesh Under. Eine weitere Arbeitsgruppe der IETF (Routing Protocol for Low power and Lossy Networks - ROLL) beschäftigt sich mit dynamischen Routing-Verfahren, die besser auf die Bedingungen von WSNs zugeschnitten sind. Ein vorläufiges Ergebnis dessen ist das RPL (Routing Protocol for Low power and Lossy Networks). Es verbindet Forderungen nach einem effizienten Energiemanagement (lange Power-Down-Phasen) mit den Vorteilen von IPv6. Momentan findet es z.B. Anwendung in ContikiRPL.



Bevorzuge Anwendungsgebiete

Durch die Nutzung von IPv6 ist 6LoWPAN optimal geeignet, um Datenfunk- bzw. Sensornetzwerke in eine bestehende IP-Infrastruktur einzubetten, z.B., um einzelne Sensorknoten oder ganze Netzwerke mit dem Internet zu verknüpfen. Auch im Bereich der Machine-to-Machine Kommunikation findet 6LoWPAN Anwendung. Beispielsweise wird 6LoWPAN von SP100.11 verwendet. Damit ist 6LoWPAN auch für Anwendungen im Bereich Industrial Automation interessant.

ZigBee

Die Zigbee-Spezifikationen werden von der ZigBee Alliance veröffentlicht und gepflegt; momentan gibt es ZigBee PRO und ZigBee RF4CE (siehe Abschnitt **RF4CE**). Diese Industrie-Allianz besteht dabei aus mehreren großen Unternehmen, die die Standards und Spezifikationen erarbeiten, die Zertifizierung Ihrer Produkte vornehmen sowie an der Finanzierung der Allianz beteiligt sind. Beispielsweise wurde von Atmel der BitCloud Stack veröffentlicht. Diese ZigBee Pro wird in diesem Abschnitt exemplarisch für einen ZigBee-Stack genutzt. Es gibt darüber hinaus mittlerweile eine Unzahl an weiteren Implementierungen von anderen Herstellern. Die Zertifizierung sowohl von fertigen Produkten durch die akkreditierte Institute sowie von ZigBee Implementierungen durch die Allianz selbst spielt dabei eine wichtige Rolle: Dadurch ist Interoperabilität zwischen ZigBee-Geräten verschiedener Hersteller gewährleistet.

Aus Sicht des Entwicklers bietet ZigBee einige Vorteile im Vergleich mit dem 802.15.4 MAC. Eine ganze Reihe von unterschiedlichen Funktionen ist bereits implementiert. U.a. zu nennen sind Mechanismen für Over-The-Air-Firmware-Update, Channel Agility, Low-Power-Betrieb, die Nutzung von Sicherheits-Zertifikaten sowie verschiedene vorgefertigte Anwendungsprofile. Damit wird effektiv Entwicklungszeit eingespart: Dem Entwickler wird der Implementierungsaufwand für die Netzwerkschicht abgenommen. Eine ähnlich niedrige Netzwerk-Latenz, hohe Datenraten sowie niedriger Energieverbrauch sind natürlich mit ZigBee möglich. Eine hardwarenähere und applikationsspezifische Implementierung auf Basis von 802.15.4 MAC kann jedoch in Bezug auf diese Parameter oft eine deutlich bessere Performance erzielen.

Besonders wichtig bei ZigBee ist die Bildung sog. Mesh-Netzwerke (also einer vermaschten Netzwerk-Topologie). Durch die hohe Anzahl an möglichen Paket-Routen wird durch hohe Redundanz die Übertragungssicherheit im Gegensatz zu anderen Netzwerktopologien gesteigert. In **Abbildung 4** ist der Aufbau eines solchen Netzes beispielhaft dargestellt.

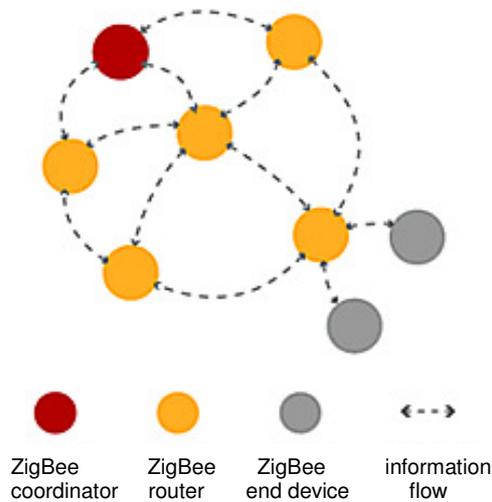


Abbildung 4: Aufbau eines ZigBee-Mesh-Netzwerks (Quelle: ZigBee Alliance [2])

ZigBee verfügt über eine stark ausgeprägte Sicherungsschicht. Für den Anwender bedeutet das eine hohe Übertragungssicherheit. Durch die Verwendung von Empfangsbestätigungen (engl.: Acknowledgements bzw. ACKs) wird die erfolgreiche Übertragung eines Telegramms quittiert. Im Fall einer Übertragungsstörung kann dies erkannt werden und die Daten zu einem späteren Zeitpunkt erneut gesendet werden.

ZigBee bietet dem Entwickler zudem eine gewisse Skalierbarkeit. Der Stack ist dazu in verschiedenen Ausbaustufen verfügbar. Dabei stellt ZigBee Pro die grundlegenden Netzwerk-Funktionen zur Verfügung. Zusätzlich ist es möglich auf Basis dessen unterschiedliche Applikationsprofile wie z.B. Smart Energy oder Home Automation zu verwenden. Diese Profile greifen auf die ZigBee Cluster Library zurück und sind z.B. in der BitCloud Profile Suite enthalten. Je nach Anwendung erlauben sie dem Entwickler, auf bereits vordefinierte Funktionen zurückzugreifen. Damit sinkt der Implementierungssowie der Entwicklungsaufwand gleichermaßen. Zusätzlich wird über die Verwendung von einheitlichen Anwendungsprofilen innerhalb von ZigBee-Geräten von verschiedenen Herstellern die Interoperabilität untereinander gewährleistet. Die Konsequenz daraus ist, dass Geräte nahtlos in bestehende Installationen integriert werden können. Es ist also möglich ein Schalter der Firma X mit einem Gerät der Firma Y (z.B. einer ZigBee-fähigen Deckenlampe oder einer Jalousie) zu kombinieren.

In der folgenden **Abbildung 5** ist die Architektur der BitCloud Profile Suite skizziert. Die rot markierten Bereiche sind für die Abhandlung der hardwarenahen Funktionalitäten zuständig. Diese sind gemeinhin das, was als ZigBee-Stack bezeichnet wird. Die grün gekennzeichneten Teile sind profilspezifisch und stellen standardisierten Schnittstellen der Applikation dar. Der dunkelgrau gekennzeichnete Bereich ist der Teil, der vom Entwickler zu implementieren ist; er entspricht der eigentlichen Applikation.



Bereits angesprochen wurde, dass Atmels ZigBee PRO eine beispielhafte Implementierung eines ZigBee-Stacks darstellt. Darüber ist ebenfalls die Bitcloud Profile Suite von Atmel verfügbar, welche die folgenden Standards beinhaltet:

- ZigBee Smart Energy 1.1 (ZSE 1.1)
- ZigBee Home Automation (ZHA)
- ZigBee Building Automation (ZBA)

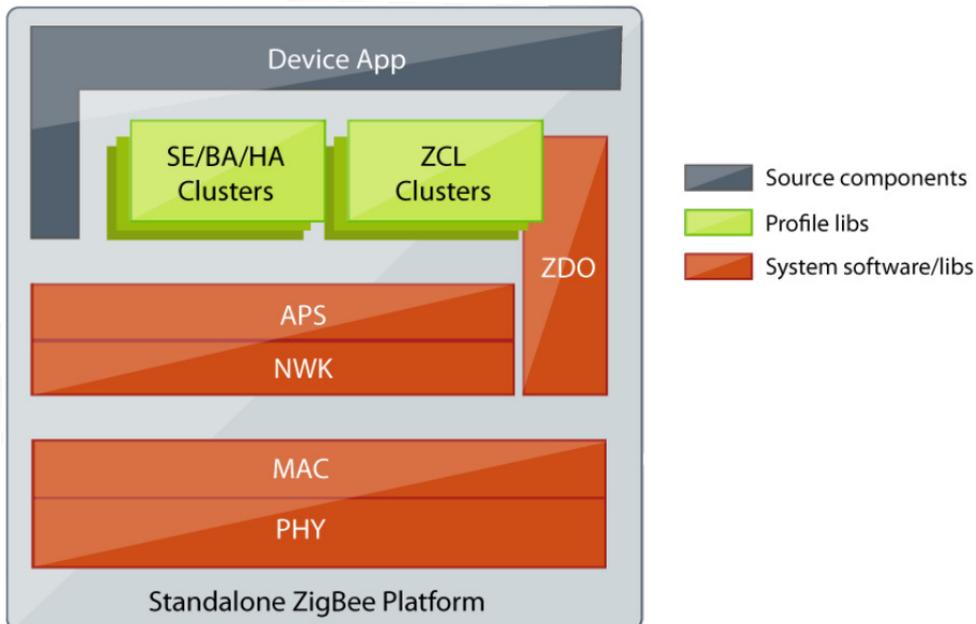


Abbildung 5: BitCloud Profile Suite Architektur

(Bildquelle: AVR2055: BitCloud Profile Suite Quick Start Guide, Atmel® Application Note)

Bevorzugte Anwendungsgebiete

BitCloud Pro:

- Komplexe Netzwerke mit großer räumlicher Ausdehnung
- Multi-Hop Netzwerke
- Proprietäre Mess- und Automatisierungslösungen



BitCloud Profil Suite:



Der ZigBee Smart Energy (ZSE) Standard stellt eine komplette Lösung für **Smart Metering** Anwendungen mit vordefinierten Geräte- und Anwendungsprofilen wie z.B. Gas-, Wasser- und Stromzähler, Thermostaten sowie Überwachungsdisplays bereit. Zahlreiche bereits im Vorhinein implementierte Features unterstützen dabei den Entwickler.



Mit dem ZHA-Standard ist ZigBee auch im Bereich der **Home Automation** zu Hause. Es prädestinieren sich Anwendungen mit einer Gruppe von vordefinierten Gerätetypen und Funktionen wie Lichtschalter, Klimasteuerungstechnik, Türschließer und Alarmanlagen. Darüber hinaus sind in den Profilen eine Reihe von unterschiedlichen Sensortypen definiert. Alles in allem ergibt sich so ein breites Fundament, auf dem Home Automation Lösungen entstehen können.



Weiterhin bietet ZigBee auch ein standardisiertes Profil für **Building Automation**. Hier stehen dem Entwickler Gebäudeautomatisierungs-Anwendungen mit vordefinierten Funktionen für Beleuchtungs- und Sicherheitstechnik sowie Gebäudenutzungsüberwachung zur Verfügung. Dieses Profil bietet zudem den Vorteil der Kompatibilität mit BACnet. Dadurch kann eine einfache und nahtlose Integration in bereits bestehende Gebäudeautomatisierungssysteme erfolgen. Genau wie bei den anderen bereits genannten Profilen stehen auch hier wieder eine ganze Reihe von unterschiedlichen vordefinierten Sensoren und Geräten zu Verfügung.

Weitere ZigBee-Anwendungs-Profile:



RF4CE

Als weiteres 802.15.4-basiertes Protokoll existiert RF4CE (Radio Frequency for Consumer Electronics). Der Schwerpunkt hier liegt jedoch ganz eindeutig bei Fernsteuerungen, besonders im Bereich der Unterhaltungselektronik. Infrarotfernbedienungen werden immer mehr durch funkbasierte Lösungen ersetzt. Diese bieten den entscheidenden Vorteil, dass keine Sichtverbindung notwendig ist um Signale zu übertragen.

Grundsätzlich wird bei RF4CE zwischen zwei unterschiedliche Typen von Knoten (engl.: node) unterschieden: Target und Controller. Das Target Node oder Device (also das zu steuernde Endgerät) fungiert als PAN-Koordinator und kann damit eigenständig Netzwerke (WPANs) starten. Entsprechende Funkfernbedienungen werden Controller Nodes genannt. Damit sich ein Controller mit dem Netzwerk



bzw. mit dem zugehörigen Target Node verbindet, muss das sog. „Pairing“ ausgeführt werden. Eine Fernbedienung kann dabei mit mehreren Targets gepaart werden. Dies wird in **Abbildung 6** illustriert, der Controller in der Mitte des Bildes steuert drei unterschiedliche Targets: TV, DVD und CD.

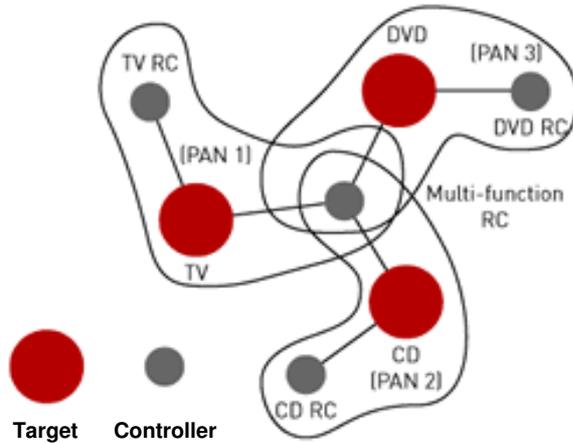


Abbildung 6: Typisches RF4CE-Netzwerk [3]

RF4CE bedient sich im 2,4 GHz-Band insgesamt nur dreier unterschiedlicher Kanäle. Zwischen diesen kann jedoch, falls es die Situation erfordert, automatisch gewechselt werden. Dadurch kann die Koexistenz mit anderen Funkteilnehmern im 2,4 GHz-Bereich (typischerweise WiFi und Bluetooth) gewährleistet werden. Das sog. Target Device legt dazu beim Hochfahren auf Grundlage der Empfangsbedingungen den eigenen Kanal automatisch fest. Treten während des Betriebs Interferenzen mit anderen Geräten auf, kann das Target Device den Kanal dynamisch wechseln. Die entsprechenden Controller finden den neuen Kanal dann selbstständig [4].

Bevorzugte Anwendungsgebiete

- Fernsteuerung von Geräten der Unterhaltungselektronik
- Ersatz von Infrarotfernbedienungen
- Drahtlose Eingabegeräte für PCs und Spielekonsolen



Gegenüberstellung der Protokolle

Gegenüberstellung nach Features

Die folgende Tabelle zeigt, was die einzelnen Standards an Funktionalität mitbringen. Dem Entwickler ist es jedoch freigestellt, diesen standardisierten Funktionsumfang zu erweitern: D.h. er könnte beispielsweise die Funktionalität Multi-Hop-Fähigkeit für 802.15.4 MAC selbst implementieren.

| Feature | 802.15.4 MAC | 6LoWPAN | ZigBee Pro | RF4CE |
|-------------------------------------|---|--|--|---|
| Mögliche Netzwerk-Topologien | Stern | Baum, Mesh | Mesh | Stern |
| Multi-Hop fähig | Nein | Ja | Ja | Ja |
| Over the Air Update | Nein | Nein | in ZigBee Smart Energy standardisiert | Nein |
| IPv6 kompatibel | Nein | Ja | Nein | Nein |
| Automatisierter Kanalwechsel | Nein | Nein | Ja | Ja |
| Mögliche Frequenzbänder | 2,4- und Sub-GHz | 2,4- und Sub-GHz | 2,4- und Sub-GHz | 2,4- und Sub-GHz |
| Maximale Anzahl von Knoten | Implementierungsabhängig | > 64000 | > 64000 Knoten pro Netzwerk | N/A |
| Stand-By-Modi | Müssen selbst implementiert werden | Je nach Implementierung vorhanden ¹ | Bereits vorhanden | Bereits vorhanden |
| Netzwerksicherheit | AES-128 möglich | AES-128 möglich | AES-128 möglich | AES-128 möglich |
| End-to-End Verschlüsselung | keine | IPSec geplant ² | Application Link Keys | Keine |
| Bevorzugtes Anwendungsgebiet | Punkt-zu-Punkt Verbindungen, Netzwerke mit niedriger Knotenanzahl | WPANs mit IP-Connectivity | Smart Energy und Home Automation Anwendungen | Funkfernbedienungen für Unterhaltungselektronik |

¹ Z.B. in Contiki durch Verwendung von RPL/CoAP realisiert. Weitere Informationen dazu siehe [5].

² Ist bislang in keiner 6LoWPAN-Implementierung verfügbar, mögliche Konzepte werden momentan von der IETF diskutiert [6].



Gegenüberstellung nach Speicherbedarf

Letztendlich zählen bei der Auswahl des passenden Funk-Protokolls nicht nur die gewünschten Funkfunktionalitäten sondern auch der auf dem Zielsystem zur Verfügung stehende Speicherplatz (in Form von Flash-Speicher und RAM). Natürlich lässt sich häufig auch ein baugleicher Controller mit größerem Flash beschaffen, dies kann jedoch aus einer Reihe von Gründen nicht immer praktikabel sein (Kostenfaktor, Inkompatibilität, Marktlage usw.). Als Faustregel kann außerdem formuliert werden, je größer der Platzbedarf im Flash, desto umfangreicher und größer ist der gesamte Stack aufgebaut. Damit verlängern sich zwangsläufig Netzwerklatenzen. Darüber hinaus schafft dies einen erhöhten Bedarf an RAM-Speicher. **Abbildung 7** gibt einen Überblick über einige in diesem Whitepaper vorgestellte Implementierungen. Zu beachten ist, dass diese Zahlen für den Stack inkl. einer Minimalanwendung stehen. Werden vom Entwickler anspruchsvolle Applikationen implementiert, kann der Speicherbedarf noch einen deutlichen Zusatz erfahren. Ein Beispiel: Bei der BitCloud Profil Suite stehen dem Entwickler beim Einsatz eines deRFmega128-Moduls noch ganze 28 kB Flash-Speicher zur Verfügung – über 78% des Speichers sind von vornherein bereits belegt. Ebenso deutlich wird der minimalistische Ansatz des 802.15.4 MAC; er braucht mit gerade einmal 16 kB wirklich nur einen Bruchteil der „großen“ Protokolle.

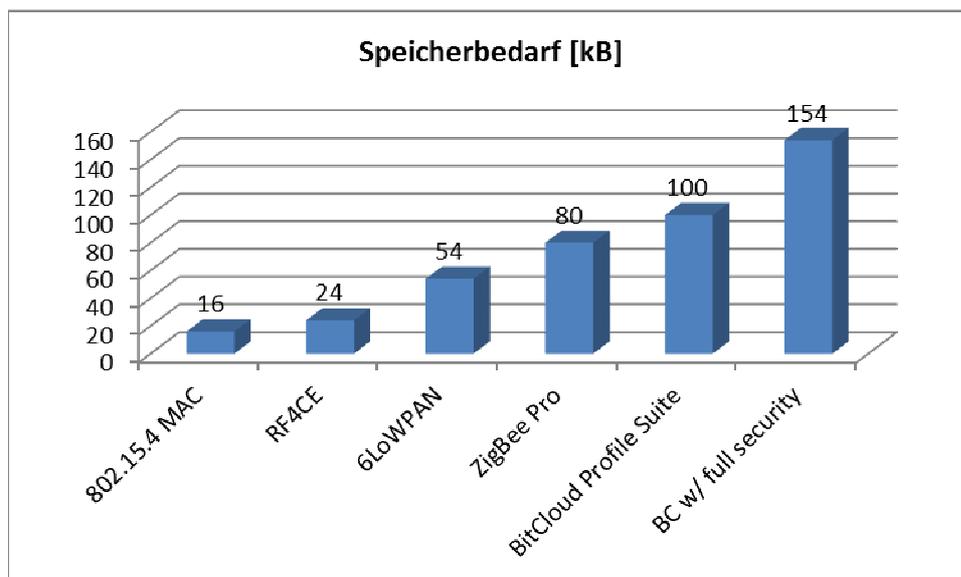


Abbildung 7: Speicherbedarf unterschiedlicher Protokolle im Vergleich

Zusammenfassung und Ausblick

Durch die Vielzahl an verfügbaren Protokollen ist dem Entwickler von Datenfunklösungen ein breiter Handlungsspielraum gegeben. Dieser reicht vom Einsatz von 802.15.4 MAC für minimalistische Netzwerke bis hin zur BitCloud Profile Suite, die bereits vordefinierte Geräteklassen inklusive typischer Funktionen zur Verfügung stellt.

Die größten Freiheiten bezüglich der Implementierung lässt 802.15.4 MAC: Hier steht es dem Entwickler theoretisch frei, sein eigenes Protokoll zu implementieren. Darüber hinaus können Mechanis-



men bzw. anwendungsspezifische Zeitregime genutzt werden, die es ermöglichen, mit einem Minimum an elektrischer Leistung auszukommen.

Die anderen hier aufgeführten Protokolle nehmen dem Entwickler vorab einen Teil seiner Arbeit ab, indem sie mit fertigen Mechanismen für Netzwerk- und Energiesparfunktionen aufwarten. Diese sind dadurch aber komplexer und erreichen nicht die Energie- und Speichereffizienz von 802.15.4 MAC.

Die Hauptkriterien, nach denen das passende Protokoll ausgewählt wird, sind folgende:

- Benötigte Datenrate
- Verfügbare elektrische Versorgungskapazität
- Anzahl der Netzwerkknoten
- Notwendigkeit von IP-Konnektivität

Wie bereits erwähnt, muss der Einsatz eines bestimmten Protokolls immer in Abhängigkeit von der zu realisierenden Anwendung gesehen werden. Um eine grobe Orientierung zu geben, kann jedoch folgendes angenommen werden:

802.15.4 MAC

- Einfacher bis einfachster Netzwerkaufbau
- Geringe Anzahl von Knoten (für gewöhnlich 2 - 10 Knoten, jedoch weit mehr möglich)
- Hohe Nettodatenrate notwendig
- Minimaler Energiebedarf gewünscht (z.B. für Energy Harvesting oder extrem langer Batterielebensdauer)

6LoWPAN

- Das Funknetzwerk soll IP-Konnektivität zur Verfügung stellen.
- Hohe Komplexität des Netzwerks (>10 Knoten)
- Latenz- und Datenraten zweitrangig, Datenrate jedoch höher als bei ZigBee
- Höhere Reichweite und Multihops nötig

ZigBee

- Es soll Kompatibilität mit Geräten anderer Hersteller vorliegen, und die Anwendung in eines der vorgegebenen Profile passen
- Hohe Komplexität des Netzwerks (>10 Knoten)
- Es steht ein entsprechender Controller mit genügend Speicher zur Verfügung
- Gesicherte Zustellung von Paketen benötigt
- Multihops

RF4CE

- Für Fernbedienungen
- Consumer Elektronik



Referenzen

- [1] **Jonathan Hui, David Culler, Samita Chakrabarti.** 6LoWPAN: Incorporating IEEE 802.15.4 into the IP architecture. *Whitepaper*. s.l. : IPSO Alliance, 2009.
- [2] **ZigBee Alliance.**
<http://www.zigbee.org/Specifications/ZigBee/NetworkTopology.aspx>
- [3] **ZigBee Alliance.** ZigBee RF4CE. [Online] 2011.
<http://www.zigbee.org/Specifications/ZigBeeRF4CE/NetworkTopology.aspx>.
- [4] **ZigBee Alliance.** Understanding ZigBee RF4CE. [Online] 2009.
<http://www.zigbee.org/imwp/download.asp?ContentID=16212>.
- [5] **Matthias Kovatsch, Simon Duquennoy, and Adam Dunkels.** A Low-power CoAP for Contiki. In *Proceedings of the IEEE Workshop on Internet of Things Technology and Architectures*, Valencia, Spain, October 2011.
(<http://www.sics.se/~adam/kovatsch11low-power.pdf>)
- [6] **S. Park, K. Kim, W. Haddad (Ed.), S. Chakrabarti, J. Laganier, Juniper.** IPv6 over Low Power WPAN (6lowpan), Internet-Draft, March 15, 2011.
(<http://tools.ietf.org/html/draft-daniel-6lowpan-security-analysis-05>)



dresden elektronik ingenieurtechnik gmbh
Enno-Heidebroek-Straße 12
01237 Dresden
GERMANY

Tel. +49 351 - 31850 0
Fax +49 351 - 31850 10
www.dresden-elektronik.de
E-Mail wireless@dresden-elektronik.de

Markenzeichen

- 802.15.4™ ist ein Markenzeichen des Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- ZigBee® ist ein eingetragenes Markenzeichen der ZigBee Allianz.
- Atmel® ist ein eingetragenes Markenzeichen oder Markenzeichen der Atmel Corporation oder ihrer Tochterunternehmen.

Diese Markenzeichen sind durch ihre jeweiligen Eigentümer nur in bestimmten Ländern eingetragen. Andere Marken und ihre Produkte sind Markenzeichen oder sind eingetragene Markenzeichen ihrer jeweiligen Eigentümer und sollten als solche beachtet werden.

Haftungsausschluss

Inhalt und Gestaltung dieses Dokuments sind urheberrechtlich geschützt. Die Vervielfältigung, Verbreitung und Speicherung der enthaltenen Texte, Bilder und Daten bedürfen der vorherigen schriftlichen Zustimmung der dresden elektronik ingenieurtechnik GmbH.

Die auf diesen Seiten zur Verfügung gestellten Informationen wurden unter Beachtung größter Sorgfalt erarbeitet und ergänzt. Dennoch kann keine Garantie für die Richtigkeit und Vollständigkeit der angegebenen Informationen und Daten übernommen werden, da zwischenzeitlich eingetretene Änderungen nicht gänzlich auszuschließen sind.

Copyright © 2012 dresden elektronik ingenieurtechnik gmbh. Alle Rechte vorbehalten.