

## Generische Funksysteme für IoT und Industrie 4.0

Jörg F. Wollert<sup>1</sup>,

**Abstract:** Eingebettete Systeme sind aus keinem Lebensbereich mehr Weg zu denken. Von der Kaffeemaschine über Smart-Watches, bis zu technischen Systemen die uns das Leben vereinfachen. Embedded Systems sind allgegenwärtig. Die Informationen, die gesammelt und verarbeitet werden, sind vielfach so interessant, dass sie ausgetauscht und aufbereitet werden. Am besten frei von allen Kabeln und technischen Einschränkungen. Das Internet der Dinge (IoT – Internet of Things) ist folglich ohne Embedded Funktechnologie nicht denkbar. In diesem Artikel werden einige Aspekte des Embedded Designs funkbasierter Systeme näher erläutert, um Strategien und technische Anforderungen besser abschätzen können.

**Keywords:** Funk, ISM, SRD, IoT, Wireless, COTS, CUL, SOC, Industrie 4.0, Smart Factory

### 1 Einleitung

Das Internet der Dinge wächst. Aus Fachkreisen wurden für das Jahr 2015 15 Milliarden an das Internet angeschlossene Geräte prognostiziert. In weiteren fünf Jahren, bis 2020, sollen es gar 50 Milliarden Geräte sein. Bei aktuell 7,7 Milliarden Menschen auf der Erde benötigt nicht einmal die Hälfte jeweils fünf internetfähige Geräte um die Zahlen zu erreichen. Bei alle den Internetfähigen Systemen wie Mobiltelefone, Tablets, iPods, Laptops und Rechner im Büro und Zuhause wird die Zahl schnell erreicht. In allen Teilen der Erde werden kaum noch Geräte verkauft die nicht mehr Internet-fähig sind, allen voran Mobile Geräte der Kommunikation, Settop-Boxen, HiFi-Anlagen oder Fernseher. Auch in der Lifestyle-Industrie sind vergleichbare Trends deutlich sichtbar. Fitnessarmbänder überwachen den Lebenszyklus und bestimmen die Essgewohnheiten. Brustgurte oder Uhren messen die Herzfrequenz oder das EKG und die Sauerstoffkonzentration des Bluts. Die Aufzeichnungen werden mit dem Mobiltelefon oder einem anderen elektronischen Gerät ausgetauscht – und in der Regel in der Cloud gespeichert.

Funktechnik ermöglicht hierbei einen hohen Schutz vor Staub und Feuchtigkeit und bietet darüber hinaus mehr Freiheitsgrade im Gerätedesign. Betrachtet man im Weitern den professionellen Bereich wie Sicherheits- und Überwachungskameras, M2M-fähige technische Systeme oder die Vielzahl der Automatisierungssysteme für die industrielle Produktion, Logistiksteuerung und Gebäudeautomation, dann wird schnell deutlich, dass Funk eine wirklich bedeutende Rolle bei eingebetteten Systemen spielt. Analysten behaupten, daß Funk die Enabler- und Schlüsseltechnologie für Industrie 4.0 ist.

---

<sup>1</sup> FH Aachen - University of Applied Sciences; Lehr- und Forschungsgebiet Mechatronik und Eingebettete Systeme, Goethestr. 1, 52064 Aachen, wollert@fh-aachen.de

## 2 Entscheidung Funktechnologie

Das Internet der Dinge ist ohne Funktechnik nicht realisierbar. Mobile Systeme durch Kabelverbindungen in ihrer Mobilität einzuschränken macht keinen Sinn. Dieses betrifft die Systemauslegung in zweifacher Hinsicht. Auf der einen Seite ist das Energiemanagement zu betrachten. Ein günstiges Design, mit herausragenden Low-Power-Eigenschaften ermöglichen eine lange Batteriebensdauer oder einen vollständig Energie autarken Betrieb. Auf der anderen Seite spielt die Kommunikationsfähigkeit der Systeme eine bedeutende Rolle. Die Kommunikationsintensität, also Datenmenge und Häufigkeit haben einen ganz wesentlichen Einfluss auf die Lebensdauer des Energiespeichers. Die eingesetzte Funktechnologie entscheidet aber auch über die Kompatibilität zu anderen Geräten oder Systemen. Nur Systeme mit gleicher Kommunikationstechnologie können Daten untereinander austauschen. Das betrifft nicht nur den Frequenzbereich der Funktechnik sondern vielmehr den eingesetzten Protokollstack und die implementierten Geräteprofile. Gutes Systemdesign entscheidet sich dann an der spezifischen Aufgabenstellung.

### 2.1 Technologiekompatibilität

Kompatibilität ist eine Facette die schon fast alleine entscheidet, welche Technologie zum Einsatz kommt. Mobiltelefon und Tablets sind aktuell die Technologietreiber. Das Nachrüsten von technologischen Schnittstellen in dieser Gerätekategorie ist in der Regel weder wirtschaftlich noch attraktiv. Der Charakter, die Haptik und das Design der Geräte sollte nicht verletzt werden, damit die Bedienakzeptanz bleibt.

	5.4 GHz		2.4 GHz		868 / 912 MHz		433 MHz		170 MHz		13.56 MHz										
	GSM	LTE	WIFI	Bluetooth	Bluetooth LE	ANT+	NFC	Wireless HART	6LoWPAN	ZigBee	EnOcean	KNX-RF	M-Bus	ZWave	HomeMatic	FS20	Sub GHz	2.4 GHz			
Mobiltelefon	X	X	X	X	X	X	X													X	
Tablett / Laptop		O	X	X	O	O														X	
Industrie-automation	O	O	X	X				X			X									X	X
M2M Communication	X	X	O	O					O	O		O								X	X
Gebäude-automation	O	O	X	O	O				O	X	X	X	X	X	X	X				X	O
Sport- / Vitalsensoren					X	X			O	O										X	X

X – Bevorzugte Anwendung  
O – Optional mögliche Anwendung

Abb.1: Spezifische Technologien ermöglichen einen differenzierten Geräteeinsatz

In der vorhergehenden Abbildung sind wesentliche relevante Technologien und ihre Anwendung in technischen Systemen tabellarisch kategorisiert. Mit einem X gekennzeichnete Felder beschreiben die typische uneingeschränkte Anwendung und die typische Verbausituation. Ein O kennzeichnet die optionale, wenn auch nicht immer anzutreffende Gerätebestückung. Ein leeres Feld kennzeichnet, dass die Technologie in dem technischen System in der Regel nicht zu finden ist.

## 2.2 Protokollkompatibilität

Eine weitere wesentliche Herausforderung ist der verwendete Protokollstack. Das Erzeugen von Funksignalen, deren Übertragung und das Empfangen ist nur für proprietäre Punkt-zu-Punkt Verbindungen einfach. Ist eine Kompatibilität zu anderen Systemen erforderlich, dann müssen der Verbindungsablauf wie das Anlernen von Geräten und der Verbindungsauf- und Abbau, sowie die übertragenen Nachrichten genau definiert sein. Dieses wird in den spezifischen Protokollstacks und Profilen der jeweiligen Technologien genau definiert.

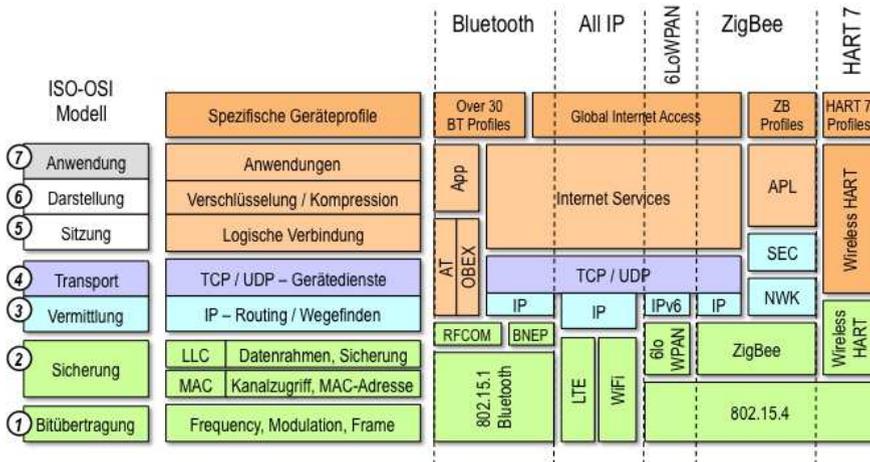


Abb.2: Der ISO-OSI-Stack macht es deutlich: Spezifische Technologien besetzen unterschiedliche Protokolllayer

Die Vorhergehende Abbildung macht es deutlich: um eine Technologie wie Bluetooth oder ZigBee zu implementieren, ist ein umfangreicher Softwareprotokollstack notwendig. Wenn nur Teile der Funktionalität des kompletten Stacks benötigt werden regeln Profile die individuelle Verwendung der einzelnen Protokollelemente. Bluetooth und ZigBee sind gute Vertreter der konfigurierbaren Protokollstacks. Mit Profilen für Anwendungsbereiche wie Automotive, Medical oder Buildingautomation sind sehr differenziert auch kleinste Applikationen möglich.

Gleichzeitig ist der Trend „All-IP“ erkennbar. Hierunter versteht man, dass alle Geräte

die Internetprotokolle IP und TCP bzw. UDP in ihrer Kommunikationsstruktur einbinden – ohne TCP/IP ist das Internet der Dinge (IoT) nicht möglich. Eine globale Sichtbarkeit von Geräten im Internet setzt eine einheitliche Struktur voraus – und das ist mit der Implementierung des TCP/IP Protokollstacks gegeben. Leider geht All-IP auch mit einer vergleichsweise hohen Komplexität und damit einem hohen Bedarf an Speicher und Rechenleistung einher. Diesem Trend kommt 6LoWPAN (IPv6 Low-energy Wireless Personal Area Network) entgegen, was eine schlanke IPv6 Anbindung über einen IEEE 802.15.4 Radio ermöglicht, darüber hinaus werden neue Versionen von „Bluetooth SMART“ auch eine vollständige IP-Unterstützung bieten. Dieses bringt IP an Geräte, bei denen sich WiFi aus Energie- und Kostengründen ausschließt.

Für den Embedded-Bereich stellt sich sehr schnell die Frage welche Technologie sich mit welchem Aufwand Implementieren lässt und welche Skalierungsmöglichkeiten bestehen. Das ist eine Frage der Embedded Chipsätze und des Systemdesigns.

### **3 Embedded Hardware Design**

Das Design von Hochfrequenzsystemen ist nicht trivial. Auch im Zeitalter von hochintegrierten Chipsätzen ist ein profundes Knowhow im Umgang mit HF notwendig. Das zeigt sich in der geschickten Anordnung von Leiterbahnen, der Groundführung und der Spannungsversorgung sowie der Antennenanpassung. Alles zusammen ist für die Qualität eines Systems von größter Bedeutung. Ein Designfehler in der Hardwareanbindung kann schnell das Linkbudget dezimieren und damit Reichweite und Low-Power-Verhalten dramatisch verschlechtern. Darüber hinaus müssen Funksysteme zertifiziert werden und im besonderen Funksysteme mit Markenrechten wie Bluetooth®, EnOcean®, ZigBee® oder ZWave® müssen ein Zertifizierungsprogramm durchlaufen.

Um dennoch den Modulherstellern die Chance einer akzeptablen Funkimplementierung zu ermöglichen, haben sich heute vier verschiedene Vorgehensweisen etabliert.

Der erste Vertreter dieDie Königsklasse der Funksysteme ist das eigene Hard- und Softwaredesign. Dieses lohnt sich im Besonderen wenn große Stückzahlen zu erwarten sind. Zumeist wird auf kostengünstige Wireless Transceiver gesetzt, die hinsichtlich ihres spezifischen Einsatzgebietes optimiert werden. Die gesamte Software, inklusive Firmware und Protokollstacks, sowie die eigentlichen Applikation werden in dem Host-Mikrocontroller implementiert. Derartige Systeme erfordern die größte Erfahrung in der Implementierung von Funksystemen und haben gleichzeitig die größten Aufwände in der Softwareerstellung. Der Vorteil ist der uneingeschränkte Zugriff auf alle notwendigen Ressourcen. Diese Lösung bleibt Spezialisten vorbehalten.

Die zweite Skalierungsstufe sind die sogenannten NCPs. Network Co-Prozessoren bearbeiten den vollständigen Protokollstack der eingesetzten Technologie und stellen die gesamte Funktionalität des Netzwerks einem Host-Mikrocontroller zur Verfügung. Der Entwickler benötigt keine detaillierten Kenntnisse der eingesetzten Funktechnik, sondern

er kann sich auf die Programmierung und Nutzung der Anwendungsschnittstelle reduzieren. Das ermöglicht deutlich verbesserte Time-to-market-Zeiten im Vergleich zur ersten Lösung (Partitioning A). Vielfach sind bei NCPs auch komplette Module verfügbar, so dass sich der Systementwickler um den HF-Teil der Anwendung und der Protokollstacks keine Gedanken machen muss.

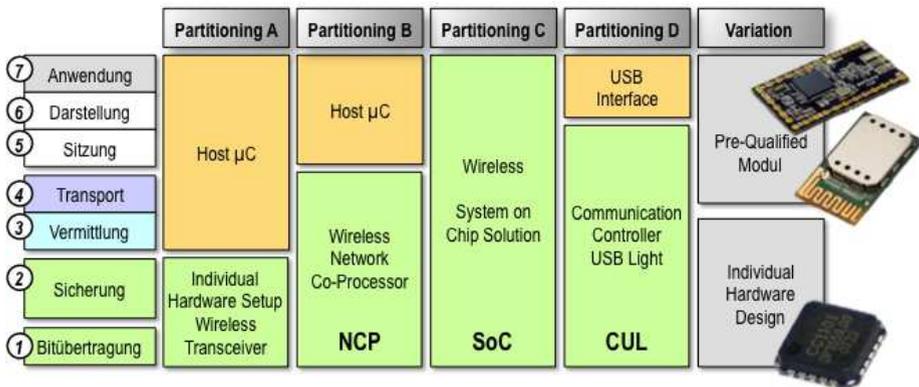


Abb.3: Von der klassischen 2-Chip-Lösung bis hin zu System-on-Chip-Lösungen sind verschiedene Realisierungsoptionen mit unterschiedlicher Komplexität möglich

Für extreme Low Power Anwendungen kommen zumeist SoCs zum Einsatz. So genannte System-on-Chip Systeme ermöglichen die größtmögliche Integration und Reduktion des Footprints. Da die Wireless-Kommunikation in der Regel die größte Herausforderung der gesamten Anwendung ist, stellen SoCs die gesamte Kommunikation innerhalb des Chips zur Verfügung und bieten den Programmierer für seine Anwendungen eine API an und die Möglichkeit seinen Usercode auf dem SoC laufen zu lassen. Auch hier findet sich eine Vielzahl unterschiedlicher Modulhersteller, die vorqualifizierte Funkmodule in unterschiedlichsten Funktechniken und Prozessorausstattungen am Markt anbieten.

Eine spezielle Variante dieser SoCs sind die so genannten CULs. Diese Communication USB Light sind spezialisierte SoCs, die über eine USB-Schnittstelle einen virtuellen seriellen Zugang zu einem 1. Level Host wie z.B. einem PC, einem Raspberry PI oder vergleichbaren Systemen zulassen. CULs werden gerne mit etablierten Betriebssystemen wie Windows, MAC OSX, Linux oder Android eingesetzt, da hier auf eine standardisierte Softwareschnittstelle gebaut werden kann. Der Softwareentwickler muss keine spezialisierten Treiber entwickeln sondern kann sich auf seine Applikation reduzieren. Mittlerweile haben sich Communities zusammen gefunden, um auf der Basis von CULs auch komplexeste Systeme aufzusetzen Als Beispiel kann hier FHEM genannte werden. Dieses Open-Source Home Automation System setzt auf den Standard Raspberry PI und bietet die spezifischen Funkschnittstellen der Gebäudeautomation fast ausschließlich über CULs ein.

Darüber hinaus bieten die führenden Chiphersteller unterschiedlichste vorgefertigte Systemlösungen an. Für Multi-Channel-Sub-GHz-Anwendungen hat Texas Instruments verschiedene Lösungen auf der Basis des CC1101 Transceiver Bausteins im Programm. Welche SoC-Lösung letztendlich eingesetzt wird hängt ganz wesentlich von der Zielrichtung der Applikation ab. Klassische Low-End-Anwendungen sind mit dem 8051-kompatiblen CC1110 zu realisieren. Durch eine hohe Integration sind einfache 8-Bit Applikationen für Low-Power-Anwendungen umzusetzen. Der CC430 SoC integriert den populären 16-Bit-Low-Power- $\mu$ C MSP430 mit einem CC1101 Radio.

Bei allen CC1101-basierten Radios ist eine optionale Leistungssteigerung durch den CC1190 Rangeextender möglich. Hierbei leiden systembedingt die Low-Power Eigenschaften, ermöglicht aber eine weitreichende Skalierung der Systemschnittstelle.

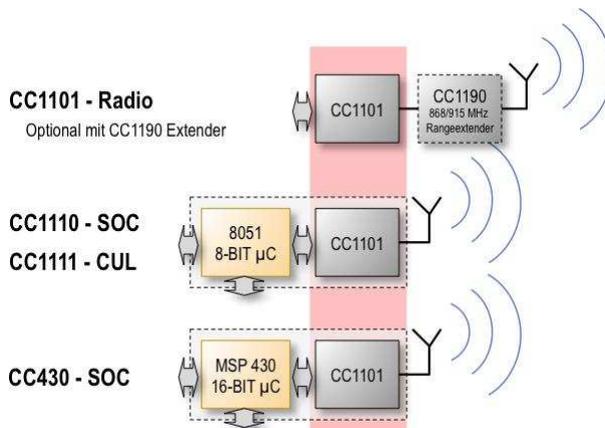


Abb. 4: TI – Sub-GHz Funkfamilie mit unterschiedlichen  $\mu$ C

## 4 Technische Low-Power Realisierung

Ein der größten technischen Herausforderungen ist das Energiemanagement bei Funksysteme. Ziel ist immer ein System, welches so gut wie keine Energie verbraucht, dabei Energieautark betrieben werden kann, eine große Reichweite hat, unbegrenzt viele Teilnehmer im Netzwerk halten kann und darüber hinaus eine hohe Datenrate bis hin zu Internet Protocol (IP)-Kompatibilität. Das ist jedoch bei weitem nicht realistisch. Mit jedem übertragenen Bit wird Energie abgestrahlt und das bedeutet, dass viel Daten auch viel Energie kosten. Das Selbe gilt für die Reichweite. Bei gleicher Empfängerempfindlichkeit hilft nur eine große Sendeleistung. Und da zwischen Entfernung und Reichweite eine quadratische Abhängigkeit herrscht hat man nur sehr eingeschränkte Möglichkeiten Energie zu sparen.

#### 4.1 Klassifizierung von Gerätegruppen

Sensoren und Aktoren sind die erste Gruppe der technischen Systeme. Sensoren und Aktoren können ein ausgezeichnetes Low-Power-Verhalten aufweisen, was durch einen geringen Duty-Cycle, kleine Sendeleistungen, hohe Empfindlichkeiten und optimierte Protokolle charakterisiert ist. Die Protokolle sind für die spezifische Anwendung optimiert. Wird als Gateway ein Mobiltelefon oder ein anderes Gerät dieser Kategorie eingesetzt, dann muss die Low Energy Funktechnik Bluetooth, Bluetooth LE, ANT+ oder NFC sein. Andere Techniken kommen bei kommerziellen Gateways nicht vor. Ist eine Integration mit Mobilten Consumergeräten nicht gewünscht, dann müssen spezielle Gateways in die IoT-Welt integrieren. Hier ist man offen zu allen Schnittstellen und allen Funksystemen, sie müssen nur den speziellen Anforderungen genügen.

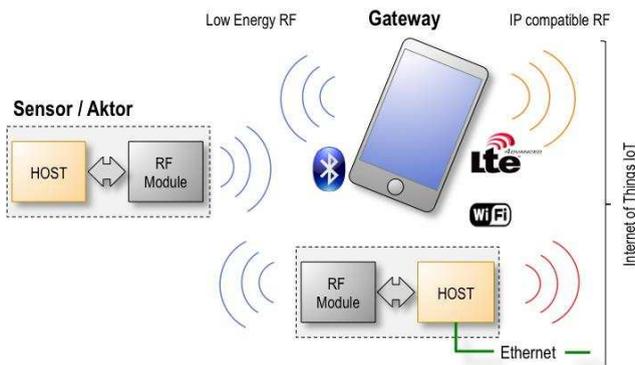


Abb.5: Das Internet der Dinge nutzt IP - Ultra Low Power Systeme benötigen ein Gateway zum Anschluss an das Internet

Technologie-Gateways sind die zweite Gruppe der technischen Systeme. Diese integrieren die Low Energy Funktechniken zu der Internet Protokoll kompatiblen Welt. Gateways brauchen nicht zwingend Low-Power-Fähigkeiten besitzen, da sie letztendlich als Gateway ohnehin ständig betriebsbereit sein müssen. Mittlerweile nutzen viele Gateways standardisierte Betriebssystemplattformen wie Linux oder Android. Ganze Technologiezweige haben sich mittlerweile auf standardisierte skalierbare Embedded Systeme spezialisiert. Raspberry PI, Arduino oder Beagle Bone sind nur einige der leistungsstarken und kostengünstigen Vertreter dieser Systemgattung.

Schließlich ist als dritte Möglichkeit noch eine direkte IP-Anbindung von Sensoren denkbar. Doch auch bei 6LoWPAN, was genau diesen Bereich abdecken soll, ist der Wechsel auf eine Low-Power Funktechnik, in diesem Fall einem IEEE 802.15.4 Layer, notwendig. Letztendlich ist diese Lösung nur ein Spezialfall der vorgestellten Varianten 1 und 2 wobei das Gateway reine Routingfähigkeiten besitzen muss und damit sehr einfach standardisierbar ist.

Es ist nur zu offensichtlich, dass eine klare Trennung von Low-Power-Netzwerken zu

IP-kompatiblen Netzwerken sinnvoll ist, um allen Anforderungen gerecht zu werden. Die Wahl der Gatewaytechnologie oder des Gateways ist dann auch entscheidend für die Kompatibilität zum Rest der Welt und dem spezifischen Anwendungsfall. Im weiteren werden nun einige Technologien näher beleuchtet, die sinnvoll im Embedded Kontext Verwendung finden.

## 4.2 Bluetooth / Bluetooth LE

Exemplarisch soll Bluetooth als ein Vertreter potentiell geeigneter Embedded Funktechniken genannt werden. Kabellose Eingabegeräte und medizinische bzw. Sport-Sensoren gehören zu den etablierten Embedded Geräten mit der Funktechnologie Bluetooth. Seit fast 15 Jahren ist Bluetooth am Markt und hat in den letzten fünf Jahren quasi in jedes Mobiltelefon, in jeden mobilen Computer oder auch dem Auto Einzug gehalten. Bluetooth Audio-Übertragungsstrecken schaffen die Freiheit vom Kabel zur HiFi-Anlage und Bluetooth-Freisprecheinrichtungen ermöglichen eine legale Telefonie während der Autofahrt. Auch „Spielzeug“ wie Lego®s RCX oder EV3 Computer besitzen diese Schnittstelle für einen unkomplizierten kabelfreien Datenaustausch.

Mit dem Alter der Technologie hat sich auch eine entsprechende Reife ergeben. Während in der 2000er Wende die Freiheit vom Kabel noch belächelt wurde, die angedachten Szenarien für utopisch gehalten wurden und die Energieverbräuche einen sinnvollen Batteriebetrieb kaum ermöglichten, sind heute die Chiphersteller teilweise mit der 8 Generation Chipsätze auf dem Markt. Das führt zu einer erfreulichen Hochintegration, einer hohen Energieeffizienz und einer akzeptablen Interoperabilität. Mit Bluetooth LE (Low Energie) in der aktuellen Bluetooth 4 Spezifikation sind auch für einfache Anwendungen eine gute Skalierbarkeit und ein wirklich günstiges Betriebsverhalten gegeben. Diese Reife zeigt sich in den aktuellen verfügbaren SoCs, die trotz komplizierten und aufwendigen Protokollstack, eine äußerst effektive Time to Market Umsetzung ermöglichen. Neben WiFi ist Bluetooth die Connectivity-Technologie schlechthin, die zudem auch Low-Power fähig ist.

Etwa 1 Milliarde Geräte mit Bluetooth-Technologie werden pro Jahr an den Kunden gebracht. Hier von einer Nischen-Technologie zu sprechen ist deutlich untertrieben. Kaum eine andere Embedded-Funk-Technologie kann auf einen ähnlichen Erfolg verweisen. So groß wie der Markt ist, so unterschiedlich sind auch die Chipsätze und SoC-Implementierungen. Man kann feststellen, dass es Hersteller gibt, die sich ganz klar dem Massenmarkt verschrieben haben (Cambridge Silicon Radio – CSR) oder andere die auch den Embedded-Markt (Texas Instruments, Nordic Semiconductors) bedienen. Für welchen Hersteller man sich entscheidet kommt alleine auf die Zielapplikation des Embedded Gerätes an. Die Unterschiedlichen SoCs sind häufig auf spezifische Profile optimiert, so dass die Implementierung nicht ausufert sondern nur die Teile der Spezifikation implementiert sind, die auch tatsächlich benötigt werden. Die folgende Abbildung gibt einen sehr kleinen Einblick in die Bandbreite und Leistungsfähigkeit einiger verfügbaren SoCs.

Ein Trend ist klar erkennbar. Mit Bluetooth 4.1 wird Bluetooth kooperativer zur LTE Funktechnik, das seit 15 Jahren angekündigte Scatter-Net wird endlich Realität und für das Internet der Dinge wird mit dem nächsten Softwarerelease auch IPv6 zum Standard gehören. Damit ist Bluetooth aktuell wie nie. Möchte man mit einem kleinen Low-Power Gerät zu Smartphones, Tablets und Laptops kompatibel sein, dann kommt man an einer Bluetooth-Lösung kaum vorbei.

	Ti CC2540	DA14580	nRF51822	CSR8645
Hersteller	Texas Instruments	Dialog Semicond.	Nordic Semicond.	Cambridge Silicon
Technology	Bluetooth LE	Bluetooth Smart	Bluetooth / Multipr.	Bluetooth 4.0
Frequency	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz
Processor	8051 MCU	Cortex M0	Cortex M0	80MHz RISC+DSP
Memory		32 k OTP 50 k SRAM 84 k ROM	16 k RAM 256/128k Flash	56 k RAM EEProm Interface
Data Rate	1Mbps	1 Mbps	250kbps, 1,2 Mbps	1,2,3 Mbps
TX Power	-20 .. +4 dBm	-20 .. +0 dBm	-20 .. +4 dBm	-20 .. +9 dBm
RX Sensitivity	-93 dBm	-93 dBm	-93 dBm BT LE	-92 dBm BT LE
TX current	31.6 mA @ 4 dBm 27 mA @ 0 dBm	3.4 mA @ 0 dBm 3V Supply	10.5 mA @ +4 dBm 8.1 mA @ 0 dBm 3V Supply	11.8 mA Stereo high Quality
RX current	19,6 mA	3,7 mA	9,5 mA @ 1M	Slave ca. 11 mA
Shut down mode	0.4 $\mu$ A	0.4 ... 1.5 $\mu$ A	<1 $\mu$ A	<1 $\mu$ A

Abb.6: Performance einiger Bluetooth SoCs für spezielle Anwendungen

## 5 Fazit

Embedded Funk ist eine Notwendigkeit für IoT und Industrie 4.0. Während noch vor gut fünf Jahren über sinn und zweck von Funksensoren diskutierte, kann man heute eine umfangliche Akzeptanz feststellen. Darüber hinaus hat sich auch die Systementwicklung radikal verändert. Während im Jahrtausendwechsel für die Entwicklung von eingebetteten Funk-Systemen ein gehöriges Maß an HF-Verständnis für das Design von Systemen erforderlich war, ist man heute bei „convinience“-Produkten angekommen. Mit NCPs, SoCs und CULs stehen vorgefertigte und generische HF-Adapter zur Verfügung die problemlos in die eigenen Geräte integriert werden können. Gerade bei kleinen und mittleren Stückzahlen ist das die günstigste Möglichkeit eine Funk-Schnittstelle zu realisieren.

	WIFI - CC3000	Ti CC2530	Ti CC2540	Ti CC1101	Ti CC430
Technology	IEEE 802.11b/g	IEEE802.15.4	Bluetooth LE	Sub-GHz	Sub-GHz
Frequency	2.4 GHz ISM	2.4 GHz	2.4 GHz	300 .. 928 MHz	300 .. 928 MHz
Processor	k.A.	8051 MCU	8051 MCU	8051 MCU	MSP 430
Data Rate	1 ... 54 Mbps	250 kbps	1000 kbps	1,2 .. 500 kbps	1,2 .. 500 kbps
TX Power	+18 dBm @11Mbps	-18 .. +4.5 dBm	-20 .. +4 dBm	-30 .. +10 dBm	-30 .. +12 dBm
RX Sensitivity	-88 dBm @ BER 8%	-98 dBm	-93 dBm	-111 dBm 1.2kbps	-113 dBm 1.2 kbps
TX current	11b 18dBm 11 Mbps 260 mA 11g 14 dBm 54 Mbps 200 mA	34 mA @ 4 dBm	31.6 mA @ 4 dBm 27 mA @ 0 dBm	21 mA @ 0 dBm	30 mA @ +12 dBm 15 mA @ 0 dBm
RX current	11bg / 100 mA	25 mA	19,6 mA	17 mA	14,7 mA
Shut down mode	5 µA	0.4 ... 100 µA	0.4 µA	<1 µA	<1 µA
Type	NCP: SPI/UART	SoC	SoC	SoC	SoC
Features	IEEE 802.11 b/g Embedded IPv4 Protocol Stack Simple Link™	IEEE802.15.4 ZigBee Pro ZigBee RF4CE 6LoWPAN	Bluetooth LE compliant Software stack USB, GPIO, USART, Timer	Wireless M-Bus IEEE 802.15.4g USART, SPI, Timer, AD, AES128 Encryption	EN 300 200 IEEE 802.15.4g USART, SPI, Timer, AD, AES128 Encryption

Abb.7: Von Wifi bis Sub-GHz Technologien sind NCPs und SoCs für Embedded Systeme als generische Plattformen verfügbar

Die Herausforderung liegt in der Einbettung des Funksystems in die Systemlandschaft. Die Trends bei Industrie 4.0 und dem Internet der Dinge schreitet nach All-IP für alles. Doch All-IP sagt noch nichts zu der Anwenderschnittstelle aus, die eine immer größere Bedeutung erhält. Darüber hinaus ist Ultra-Low-Power und All-IP (noch) nicht realisierbar, weil eine ständige Erreichbarkeit vorausgesetzt wird. Hier sollte verantwortungsvoll mit den verfügbaren Ressourcen umgegangen werden. Intelligente Gateway-Lösungen bringen hier Technologien, Anspruch und Wirklichkeit zusammen. Interessant bleiben zwei besondere Herausforderungen:

**Interoperabilität zu Smartphone und Tablett**

Sollen Handy und iPad in das Systemumfeld eingebunden werden – und zwar möglichst ohne Gateway – dann kommt man an WiFi und Bluetooth nicht vorbei. WiFi spielt eine Sonderrolle, da der System-bedingte Energiehunger bei hoher Datenrate nur mit Einschränkungen Batterie-gespeiste, oder autarke Systeme, zu lässt. Demgegenüber schafft Bluetooth SMART oder Bluetooth LE den Spagat zwischen Kompatibilität und Low Power. Intelligent aufgebaute Bluetooth LE Geräte können durchaus mit zwei AA Batterien jahrelang betrieben werden.

**Integration in Systemwelten wie z.B. in der Gebäudeautomation**

Embedded Systeme in der Gebäudeautomation und der Industriellen Kommunikation machen ebenfalls interoperable Systeme notwendig. Aufgrund der Ausbreitungseigenschaften sind hier Funkssysteme im Sub-GHz-Bereich das Maß der Dinge. Mit ZigBee, KNX-RF, Wireless M-Bus oder EnOcean sind verschiedenste Technologie verfügbar. Teilweise werden spezifische Radios voraus gesetzt, teilweise handelt es sich

nur um Protokollstacks die auf Standardhardware aufgesetzt wird. Hier entscheidet der Zielmarkt was die beste Lösung ist. Die Hardware-Auswahl ist im Wesentlichen durch die Verfügbarkeit von Software-Protokollstacks getrieben. Vergleichbares findet man bei Implementierungen im Health-oder Care-Markt oder bei Sport-Sensoren. Gerade beim letzten hat sich mit ANT+ auch eine 2.4 GHz Technologie etabliert.

Bei der Entscheidung für oder gegen ein Modul oder eine Technologie steht also immer der Zielmarkt im Fokus. Die Verfügbarkeit von Software-Protokollstacks ist folglich relevant für den Erfolg eines Produkts und eine gute Time-to-Market-Zeit.

Hier steckt dann auch der Kern der Problematik. Heute ist weniger die HF-Technik die Herausforderung sondern viel mehr die Kenntnis und die Möglichkeiten der Protokollstacks und die Umsetzung von Gateways und Systemlösungen. Technische Spezifikationen von führenden Technologien wie Bluetooth und ZigBee übersteigen dann schnell 1000 Seiten – und auch die wollen verstanden sein.

## Literaturverzeichnis

- [WOL05] Wollert, J.; Wireless Solutions? Wege in die digitale kabellose Welt, Keynote-Vortrag Wireless Technologies Kongress 12.-13.10.2005, Mannheim.
- [VABW06] Vedral, A., Altrock, R., Buda, A., Wollert, J.F., “The Capability of Bluetooth for Real-time Transmission in Automation”, Proceedings of the IASTED Int. Conference on Networks and Communication Systems (NCS 2006), ISBN: 0-88986-590-6, pp. 168-175, Chiang Mai, Thailand, March, 2006
- [BJW07] Buda, A.; Jozenfini, B.; Wollert, J. F.: „Mobile ad-hoc Network for Home Automation based on ZigBee Application Framework, ZigBee Network Layer and nanoNET Physical Layer”, 1st European ZigBee Developers’ Conference, München, 18.-19. Juni 2007
- [WW07] Weingart, D., Wollert, J.F., “Konvergenz kabelloser und kabelgebundener Automatisierungsnetzwerke mit Webservices und uPnP”, SPS/IPC/DRIVES Conference/Wireless Corner, Nuremberg, Germany, November, 2007
- [BSW08] Buda A., Schürmann V., Wollert J.F.: A Middleware Approach for IndustrialWireless Automation Networks, IASTED – Wireless and Optical Communication 2008, Quebec City, Kanada,26-28.05.2008
- [BW09] Buda, A.; Wollert, J. F.: „Funktechnologien im 2,45 GHz ISM Frequenzband: Überblick und Coexistenzeigenschaften“, VDI Automation 2009, 16.-17. Juni 2009 Baden-Baden, Germany, VDI-Bericht 2067, S. 383-386 – ISBN 978-3180920672
- [BSW10] Buda,Schuermann,Wollert: Wireless Technologies in Factory Automation, Factory Automation, Edited by Javier Silvestre-Blanes: ISBN 978-953-307-024-7, P.29-50
- [WO14] Wollert: Der Embedded Wireless-Report, Elektronik Wireless November 2014, S.18ff
- [WO14\_2] Wollert: Funkstandards für Sensornetzwerke, Elektronik 12/2014 S.36ff