

# Pervasive Computing durch Einsatz energieeffizienter Funksysteme

Markus Augel, Rainer Steffen

Fraunhofer-Einrichtung für Systeme der  
Kommunikationstechnik, München  
markus.augel@esk.fraunhofer.de

## Zusammenfassung

Dieser Beitrag gibt einen Überblick über die vielfältigen Anwendungsbereiche für energieeffiziente Funksysteme im Umfeld des pervasive computing und der ubiquitous communication. Es werden konkrete Einsatzszenarien beschrieben und die Vorteile, die sich durch den Einsatz derartiger Funksysteme ergeben, dargestellt.

Aufbauend darauf werden einige beispielhafte Funktechnologien beschrieben, deren Eigenschaften charakterisiert und einer ersten Bewertung unterzogen. Es wird deutlich, dass ein breites Spektrum unterschiedlicher Funktechnologien existiert und dass verschiedene Einsatzszenarien sehr unterschiedliche Anforderungen an die Funktechnologie haben können.

Die Auswahl der richtigen Funktechnologie für den jeweiligen Anwendungsfall ist eines der Schlüsselemente beim Entwurf neuer Systeme. Die getroffene Entscheidung kann nachhaltige Folgen sowohl auf den weiteren Entwicklungsprozess als auch auf die spätere Einsatzfähigkeit des Systems haben. In diesem Beitrag wird eine strukturierte Vorgehensweise zur anwendungsabhängigen Technologieauswahl dargestellt mit der eine optimierte Auswahl der Funktechnologie getroffen werden kann.

## 1 Einleitung

Systeme zur drahtlosen Datenübertragung haben sich in den letzten Jahren deutlich weiterentwickelt. Dies betrifft beispielsweise Parameter wie Datenrate, Reichweite und insbesondere den Energiebedarf. Funksysteme entwickeln sich zunehmend zu einer Alternative zur drahtgebundenen Kommunikation. Zusätzlich ermöglichen sie Anwendungen in Bereichen, in denen eine drahtgebundene Vernetzung zu umständlich, zu teuer oder sogar unmöglich ist. Insbesondere die Einsatzbereiche von energieeffizienten Funksystemen mit Batterielebensdauern von Monaten bis zu Jahren sind vielfältig. Sie reichen von einfachen Punkt-zu-Punkt Kommunikationsszenarien bis hin zu komplexen Szenarien mit hunderten von Kommunikationsknoten.

Drahtlose Kommunikation, verbunden mit stetig zunehmender Miniaturisierung bei höherer Leistungsfähigkeit, geringerem Energiebedarf und geringeren Kosten, trägt wesentlich zur Realisierung der Vision des pervasive computing bei. Allgegenwärtige kleinste Computer, die quasi unsichtbar in kooperierende smarte Alltagsgegenstände integriert sind, dienen dem Menschen als "digitale Heinzelmännchen". Der Wegfall der Kabel trägt dazu bei, dass die eigentliche Technologie aus Sicht des Anwenders immer mehr in den Hintergrund tritt und die Anwendungen in den Vordergrund rücken. Hierbei ist es vor allem notwendig, dass der Anwender durch Selbstorganisationsmechanismen wie Selbstkonfiguration und Selbstheilung

von mitunter komplizierten und zeitaufwändigen Konfigurations- und Administrationsaufgaben entlastet wird.

## 2 Anwendungsszenarien

Energieeffiziente Funkssysteme mit hoher Batterielebensdauer haben ein breites Anwendungsspektrum. Die Spanne der Anwendungsszenarien reicht dabei von der einfachen Punkt-zu-Punkt Kommunikation über Szenarien mit relativ wenigen Netzknoten im Bereich der Heim- und Gebäudeautomatisierung, der Industrieautomatisierung, der Landwirtschaft oder der Medizintechnik bis hin zu komplexen Anwendungen mit hunderten von Netzelementen, zum Beispiel zur militärischen Aufklärung, Erkundung und Zielerfassung.

Gründe für diese Entwicklung sind:

- Miniaturisierung von Funkchips und Prozessoren bei gleichzeitig steigender Leistungsfähigkeit, sinkendem Energiebedarf und geringeren Kosten,
- Steigerung von Flexibilität und Komfort (z.B. durch Mobilität für den Anwender) durch Ergänzung oder Ersatz von drahtgebundenen Kommunikationslösungen,
- Realisierung von Anwendungen, die mit drahtgebundener Vernetzung nicht möglich sind (z.B. aufgrund des Installationsaufwandes).

Die nachfolgend vorgestellten Anwendungsszenarien stellen eine Auswahl dar und sollen einen Eindruck von der Breite der möglichen Anwendungen geben. Letztlich entscheiden der Preis der einzelnen Netzknoten und deren mengenmäßige Verfügbarkeit über die Anzahl und die Komplexität der real umgesetzten Szenarien.

### 2.1 Heim- und Gebäudeautomatisierung

Neben einfachen Szenarien wie der komfortablen drahtlosen Steuerung der Beleuchtung mittels portabler Schalter und Dimmer oder der temperaturabhängigen Heizungsregelung sind diverse komplexe Anwendungen möglich, die sich aus der Vernetzung und der Interaktion verschiedener Sensoren und Aktoren ergeben. Beispielsweise kann die Beleuchtung in Abhängigkeit von Tageszeit und Helligkeit automatisch geregelt werden oder Fenster können in Abhängigkeit von Innen- und Außentemperatur, Schadstoffbelastung der Luft und An- oder Abwesenheit der Bewohner automatisch geöffnet oder geschlossen werden.

Weiterhin möglich sind drahtlose Sicherheits- und Überwachungssysteme, sowie Rauch-, Bewegungs- und Einbruchsmelder mit entsprechenden Alarmen bei außergewöhnlichen Vorkommnissen. Zusätzlich kann die Steuerung über den Bereich der reinen Gebäudefunktionen auf Haushaltsgeräte wie Kaffeemaschine oder Herd ausgedehnt werden.

Mit Hilfe drahtloser Fernbedienungen kann man sich dann z.B. vor dem Fernseher davon überzeugen, dass der Herd wirklich ausgeschaltet ist, und falls nicht, dies per Tastendruck nachholen.

Der Fokus der Gebäudeautomatisierung liegt nicht auf einzelnen Wohnungen sondern auf ganzen Gebäuden oder Gebäudekomplexen. Hier sind vor allem das komfortable drahtlose Auslesen von Betriebsdaten sowie das zentralisierte Management von Heizung, Lüftung und Klimatechnik von Interesse. Diese Steuerung kann zum einen vollständig automatisiert erfolgen. Zum anderen sind menschliche Eingriffe denkbar, z.B. über ein in das Netz integriertes

drahtloses Kommunikationsendgerät oder über eine Außenanbindung auch aus einer entfernten Zentrale.

Weiterhin denkbar sind drahtlose elektronische Schließanlagen, die eine zentrale Rekonfiguration von Schließberechtigungen und das komfortable Auslesen von Schließprotokollen ermöglichen. Nach der automatischen Identifikation einer berechtigten Person können darüber hinaus im Gebäude automatisch personenbezogene Einstellungen vorgenommen werden, wie z.B. die Regelung der Licht- und Temperaturverhältnisse je nach persönlichen Vorlieben.

## 2.2 Landwirtschaft

Der Einsatz von drahtlosen Sensornetzen ist in der Landwirtschaft kein neues Thema mehr und bereits in vielen Betrieben üblich. In diesem Anwendungsbereich ist mit Hilfe drahtloser Kommunikationstechnik die Steigerung der Effizienz der Produktion, mit entsprechenden finanziellen Vorteilen möglich. Typische Anwendungen liegen hier in den Bereichen Pflanzenanbau (Gewächshäuser, botanische Gärten, Weinberge) und in der Tieraufzucht (Mast- und Milchbetriebe, Fischzucht).

Durch die gezielte Überwachung von Umweltbedingungen wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck, Lichtverhältnisse, Feuchtigkeit oder Nährstoffgehalt des Bodens ergeben sich vielfältige Messdaten. Diese dienen zum einen dem Landwirt als zusätzliche Entscheidungsgrundlage über optimale Erntezeitpunkte, Düngereinsatz etc. Zum anderen können die gewonnenen Daten zur Steuerung in aktiven Prozessen eingesetzt werden. In Abhängigkeit der Sensordaten können automatisierte Systeme die Umweltbedingungen verbessern, z.B. durch automatisierte Bewässerung, Düngung, Be- und Entlüftung, Lichtsteuerung oder Heizungsregelung.

Durch den Einsatz von Sensornetzen ergeben sich in diesem Zusammenhang Vorteile wie

- verbesserter Gesundheitszustand von Pflanzen und Tieren durch individuelle Bedürfniserfüllung,
- Gezielte Einsparungen bei Pestiziden, Fungiziden, Herbiziden etc.,
- Ressourceneinsparung und Umweltentlastung (Personal, Wasser, Dünger, Strom),
- Ertrags- und Qualitätssteigerung.

## 2.3 Industrieautomatisierung

Immer höhere Anforderungen an die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit von Maschinen und Anlagen sowie Qualitätssicherung und -steigerung durch sofortige Überprüfung der Fertigungsqualität bedingen eine wachsende Anzahl von Sensoren.

Sensoren ermöglichen die Identifizierung ineffizienter Produktionsabläufe und damit Kosteneinsparungen. Durch die automatisierte Kontrolle und die damit verbundene Verkürzung der Ausfallzeiten von Maschinen können Kosten gesenkt werden. Gleichzeitig können durch die hohe Qualität der Fertigung nachträgliche Produkttests reduziert werden - die Erfüllung von Fertigungsnormen wird erleichtert. Ebenfalls von hoher Bedeutung ist die Arbeitssicherheit, die durch Sensoren gesteigert werden kann. Gefährliche Fehlfunktionen an Maschinen können schon im Entstehen erkannt und verhindert werden.

Kabelgebundene Lösungen sind vor allem bei einer hohen Anzahl nachträglich installierter Sensoren aufwändig. Der Einsatz von drahtlosen Lösungen im Industrieumfeld ist jedoch mit

Herausforderungen behaftet, da dieses Umfeld je nach konkreter Anwendung erhöhte Anforderungen an Robustheit und Zuverlässigkeit der Datenübertragung stellt. Ein interessantes Einsatzgebiet für die drahtlose Kommunikation im Rahmen der Industrieautomatisierung stellt auch die drahtlose Konfiguration von Sensoren dar.

## 2.4 Unterhaltungselektronik

Im Bereich der Unterhaltungselektronik reichen die Einsatzmöglichkeiten von der Ersetzung optischer Fernbedienungen durch Funkfernbedienungen, verbunden mit einer Komfortsteigerung, da die erforderliche direkte Sichtverbindung und somit das mitunter lästige Ausrichten auf das zu steuernde Gerät entfällt. Eine Ausnahme stellen Point-and-Shoot-Applikationen dar, bei denen das zu steuernde Gerät ausdrücklich durch Anvisieren bestimmt wird.

Weitere Einsatzgebiete sind die drahtlose Übermittlung von Steuersignalen zwischen Geräten der Unterhaltungselektronik, drahtlose Joysticks und Gamepads, Erfassung der Bewegungen und Gesten eines Menschen zur Steuerung einer Spielfigur, interaktive Spiele sowie die drahtlose Kopplung von Spielgeräten mehrerer Personen.

## 3 Übersicht unterschiedlicher Funkssysteme

Die hohe Zahl drahtloser Technologien macht den Markt zunehmend unübersichtlich. Dem hohen Marktpotential entsprechend konkurrieren diverse Technologien zur lokalen drahtlosen Datenübertragung miteinander, standardisierte wie proprietäre, die sich u.a. hinsichtlich der erzielbaren Datenrate, der Energieeffizienz, der Reichweite und der Integrationsgröße unterscheiden. Die meisten dieser Funktechnologien wurden für einen speziellen Anwendungsbereich entworfen und eignen sich in unterschiedlicher Art und Weise für die in Abschnitt 2 vorgestellten Szenarien. Nachfolgend werden die wichtigsten der heute eingesetzten Funkstandards für die lokale drahtlose Kommunikation vorgestellt und bewertet.

### 3.1 Wireless LAN

Der WLAN-Standard 802.11 [IEEE99] des Institutes of Electrical and Electronics Engineering (IEEE) wurde seit der ersten Version aus dem Jahr 1997 stetig verbessert und erweitert. In aktuellen Produkten wird meist die Variante IEEE 802.11g eingesetzt, mit der bei 2,4 GHz 54 Mbit/s übertragen werden können. Viel versprechende Erweiterungen sind IEEE 802.11e (verbessertes Medienzugriffsverfahren zur Unterstützung von Quality of Service) und IEEE 802.11n (Multiple Input Multiple Output/MIMO - Übertragungstechnik mit mehreren Antennen zur Erhöhung von Datenrate, Reichweite und Stabilität).

WLAN wird zwar in mobilen Endgeräten eingesetzt, jedoch kann in diesem Zusammenhang nicht von einer energieeffizienten Funkkommunikation gesprochen werden. Die Leistungsaufnahme eines WLAN Funkchips ist - je nach Übertragungsmodus - sehr hoch und für viele Anwendungsbereiche, bei denen es auf eine energieeffiziente Übertragung ankommt, ungeeignet.

Die Selbstkonfigurationsmechanismen von WLAN beschränken sich darauf, dass sich die Knoten ad hoc miteinander vernetzen können. Die Festlegung des dabei zu verwendenden Funkkanals muss allerdings von Hand erfolgen. Weitere Selbstorganisationsmechanismen wie adaptive Routingprotokolle wurden speziell für WLAN entwickelt [Perk01]. Die Stärken von

WLAN liegen vor allem in der relativ hohen Datenrate und der hohen Verbreitung und Akzeptanz.

## 3.2 Bluetooth

Bluetooth ist eine von der Industrie im Jahr 1999 entwickelte Spezifikation [Blue04] zur drahtlosen Kurzstreckenkommunikation, die sich vor allem in mobilen Endgeräten stark verbreitet hat. Die Spezifikation umfasst im Gegensatz zu WLAN nicht nur die physikalische Übertragungsschicht und die Sicherungsschicht, sondern weitere Bluetooth-spezifische Protokolle und Profile (Untermengen der Spezifikation für bestimmte Anwendungsfälle). Die unteren Schichten der Bluetooth-Spezifikation wurden als IEEE 802.15.1 [IEEE02] standardisiert.

Besonderheit von Bluetooth ist die Sprach-/Datenintegration, d.h. Bluetooth bietet Unterstützung für synchrone und asynchrone Daten und eignet sich damit gleichermaßen gut für beide Arten der Übertragung. Hauptanwendungsgebiete sind die drahtlose Kopplung von Headset und Mobiltelefon, die Anbindung eines Mobiltelefons an die Freisprecheinrichtung eines Fahrzeugs sowie die drahtlose Anbindung von PC-Peripheriegeräten. Mit der aktuellen Version 2.0 können im 2,4 GHz-Band 3 Mbit/s übertragen werden.

Bei der Entwicklung von Bluetooth wurde auf eine möglichst einfache und kostengünstige Realisierung sowie auf eine möglichst energiesparende Übertragungstechnik geachtet. Insbesondere bei kurzen Entfernungen und mittleren Datenraten ist Bluetooth wegen seines relativ geringen Energiebedarfs, der geringen Chipabmessungen und der niedrigen Kosten für low-power Funkssysteme geeignet. Bezüglich der Robustheit bietet Bluetooth einige Vorteile. Durch häufige Frequenzwechsel (1600 pro Sekunde) und die automatische Erkennung und Vermeidung gestörter Frequenzen (ab Version 1.2) kann Bluetooth dynamisch externen Störern ausweichen. Bluetooth wurde speziell zur konfigurationsfreien Ad-hoc-Vernetzung entwickelt, jedoch beschränkt sich dieser Selbstorganisationsmechanismus auf einfache Punkt-zu-Punkt-Verbindungen. Möchte man zur Abdeckung größerer räumlicher Bereiche die Kommunikation über mehrere Zwischenstationen abwickeln, ist dies mit Bluetooth nur mit einem erhöhten Aufwand möglich (vgl. [Auge04]).

## 3.3 ZigBee und IEEE 802.15.4

Der 2003 veröffentlichte Standard IEEE 802.15.4 [IEEE03] und die von der Industrie stammende ZigBee-Spezifikation sind eng miteinander verbunden. Oft wird nur von ZigBee gesprochen, womit sowohl der Standard als auch die Spezifikation gemeint sind. IEEE 802.15.4 definiert die physikalische Übertragungsschicht und die Sicherungsschicht. Die ZigBee-Spezifikation setzt direkt auf IEEE 802.15.4 auf und definiert Netzwerk- [ZigB04a] und Applikationsschicht [ZigB04b] und ähnlich wie Bluetooth verschiedene Profile. Beispiele sind das "Home Control, Lighting"-Profil, das "Automatic Meter Reading"-Profil oder das "Industrial Plant Monitoring"-Profil. ZigBee wurde speziell für die energieeffiziente lokale Datenkommunikation entworfen. Es wird zwischen so genannten Full Function Devices (FFD) und Reduced Function Devices (RFD) unterschieden, die sich in ihrer Komplexität und ihrem Energiebedarf unterscheiden. Ein RFD kann bis zu 99,9 % der Betriebsdauer in einem energiesparenden Modus arbeiten, woraus sich Batterielebensdauern von Monaten bis zu Jahren ergeben können.

Die erklärten Zielmärkte von ZigBee sind vor allem die Heim-, Gebäude- und Industrieautomatisierung. Erste Produkte sind verfügbar.

ZigBee bietet eine Bruttodatenrate von 250 kbit/s bei 2,4 GHz und einer Energieaufnahme von 30 – 40 mA, je nach Produkt. Gängige ZigBee-Lösungen werden in einem kleinen Formfaktor (Chipgröße ca. 6 x 6 mm<sup>2</sup>) wahlweise mit oder ohne integriertem Mikrocontroller und Protokollstack angeboten.

Ein ZigBee-Netz ist in der Lage, bei Inbetriebnahme automatisch einen ungestörten Frequenzbereich auszuwählen, der allerdings im laufenden Betrieb nicht mehr verändert werden kann. Treten Störungen also erst im späteren Betrieb auf, so kann dies die ZigBee-Übertragung massiv beeinträchtigen. Ein nachträglich auf der gleichen Frequenz betriebenes WLAN kann zu erheblichen Datenverlusten (> 90 %) [Siko04] führen. Inwiefern dieses Manko in der nächsten ZigBee-Version behoben wird, wird zurzeit unter den Mitgliedern der ZigBee-Allianz diskutiert.

ZigBee ermöglicht Multi-hop-Kommunikation und beinhaltet zur automatischen Wegewahl zwei Routingverfahren, die einen Kompromiss zwischen Adaptivität und Komplexität darstellen und die einzeln oder kombiniert eingesetzt werden können. Zusätzlich sind Mechanismen zur Neuaufnahme von Knoten in das Netz vorhanden, die greifen, falls die Funkverbindung abreißt. Die netzweite Portabilität von Endgeräten, die einen Wechsel den Gegenstelle erfordert, wird gegenwärtig jedoch noch nicht unterstützt.

### 3.4 Z-Wave

Die proprietäre Funktechnologie Z-Wave [JoJo05] des dänischen Herstellers Zensys wird inzwischen von einer breiten Allianz aus etwa 100 Unternehmen getragen, darunter mit Leviton, Danfoss und Honeywell führende Unternehmen der Heimautomatisierungsbranche. Z-Wave tritt als erklärter Konkurrent zu ZigBee im Heimbereich an und hat das Potential, ZigBee Marktanteile zu nehmen und zu einem De-facto-Standard im Heimbereich zu werden. Z-Wave-Endanwenderprodukte sind seit wenigen Jahren auf dem Markt.

Z-Wave-Knoten können sehr energiesparend arbeiten, der Hersteller verspricht eine Betriebsdauer von über 10 Jahren. Z-Wave verfügt allerdings nur über eine relativ geringe Datenrate von 9,6 kbit/s, die das System für größere Installationen mit vielen Knoten ungeeignet machen kann.

Im Gegensatz zu den anderen genannten Technologien verwendet Z-Wave das 868 MHz Frequenzband, das scharfen regulatorischen Auflagen bzgl. zulässiger Sendeleistung und Arbeitszyklus (duty cycle) unterliegt. Die Koexistenz mit anderen Funksignalen in diesem Bereich ist somit weniger problematisch. Z-Waves Selbstorganisationsmechanismen umfassen die automatische Erfassung der Netztopologie sowie das Routing. Die Installation ist so ausgelegt, dass kleinere Netze (z.B. fünf Lichtschalter und 30 Lampenmodule) auch durch nicht geschulte Endanwender in Betrieb genommen werden können. Im Gegensatz zu ZigBee unterstützt Z-Wave auch portable Endgeräte, wie z.B. Fernbedienungen.

### 3.5 Proprietäre Systeme

Neben den bekannten und oben genannten lokalen Funktechnologien gibt es eine fast unüberschaubare Vielfalt weiterer proprietärer Ansätze, die die Realisierung des pervasive computing voranbringen können. So bieten beispielsweise die Firmen Chipcon (jetzt Texas Instruments), nanotron und Nordic Funkchips an, die für energieeffiziente Kommunikation besonders geeignet sind. Dazu zählt ein Funksystem, bei dem alle wichtigen Parameter vom Sys-

mententwickler frei konfiguriert werden können. Dies betrifft unterschiedliche Bruttodatenraten von bis zu 500 kbit/s, Modulationsverfahren, Kanalbandbreiten, Sendeleistungen, Energiespar-Modi etc. Dadurch lassen sich Funksysteme realisieren, die bei geringer Belastung eine Batteriebensdauer von mehreren Jahren erzielen können (Energiebedarf des aktiven Systems ca. 15-30 mA, Sleepmode < 900 nA).

Der Vorteil von proprietären Funksystemen liegt vor allem in der hohen Flexibilität. Da der Systementwickler deutlich mehr Freiheiten hat, werden optimierte Lösungen für den jeweiligen Anwendungsfall möglich. Zusätzlich haben proprietäre Lösungen meist einen geringeren Ressourcenbedarf, da keine Interoperabilität mit anderen Systemen eingehalten werden muss, was sich meist in einer weniger komplexen Implementierung niederschlägt. Da das Funksystem auf die jeweilige Anwendung optimiert wird, kann meist nicht auf bereits vorhandene Protokollstacks und Systemkomponenten zurückgegriffen werden. Teilweise müssen selbst Grundfunktionalitäten wie der Medienzugriff, die Adressierung oder der Fehlerschutz selbst implementiert werden.

### 3.6 Fazit

Diese kurze Charakterisierung der wichtigsten Funksysteme vermittelt einen Eindruck von der großen Vielfalt unterschiedlicher Verfahren und Produkte. Basistechnologien zur Realisierung der in Abschnitt 2 vorgestellten Szenarien sind vorhanden. Jedoch sind allgemeine Aussagen, welche Technologie sich für welches Szenario eignet, nicht ohne weiteres möglich. Um eine begründete Auswahl einer Funktechnologie für einen konkreten Anwendungsfall vornehmen zu können, ist eine detaillierte Analyse des Einzelfalls (z.B. bzgl. der anfallenden Datenratemengen, Latenzanforderungen, topologischer Restriktionen etc.) und die Ableitung daraus resultierender Anforderungen notwendig. Aus dem Mapping der Anforderungen auf die Leistungsmerkmale einzelner Technologien ergibt sich letztlich eine begründete Auswahl, vgl. Abschnitt 4. Hinzu kommt, dass sich auch die Realisierungen von standardisierten Funktechnologien in Form von integrierten Schaltungen je nach Hersteller deutlich unterscheiden können (z.B. bzgl. Chipgröße, Energiebedarf, Empfangsempfindlichkeit, benötigte Außenbeschaltung etc.). Eine allumfassende Funktechnologie für pervasive computing gibt es nicht. Die Auswahl einer geeigneten Funktechnologie ist in den meisten Fällen ein komplexer Prozess, der möglichst systematisch durchgeführt werden sollte. Eine fehlerhafte Entscheidung hätte nachhaltige Folgen, sowohl auf die Entwicklungszeit, die Entwicklungskosten als auch auf die spätere Einsatzfähigkeit des Systems.

## 4 Methodik zur Auswahl der Funktechnologie

Einer der wichtigsten Aspekte bei der Realisierung eines Szenarios des pervasive computing ist die strukturierte Auswahl einer geeigneten Funktechnologie. Um eine begründete Auswahl treffen zu können, ist eine detaillierte Analyse des konkreten Anwendungsfalls erforderlich.

Ausgehend von einer Festlegung der Systemarchitektur, also der im Netz vorhanden obligatorischen und optionalen Komponenten, empfiehlt es sich, konkrete Einsatzszenarien aufzustellen anhand derer detaillierte Anforderungen z.B. an Latenz und Datenrate abgeleitet werden können. Werden die Anforderungen der jeweiligen Einzelszenarien im nächsten Schritt miteinander kombiniert, ergeben sich begründete Anforderungen. Aus der Abbildung dieser Detailanforderungen auf die Fähigkeiten der einzelnen Funktechnologien – standardisierte wie proprietäre – ergibt sich letztlich eine begründete Technologieauswahl.

Nachfolgend wird diese mögliche Vorgehensweise konkretisiert.

### 1. Aufstellen der groben Systemarchitektur

Das Aufstellen der Systemarchitektur umfasst die Identifizierung von obligatorischen und optionalen Systemkomponenten (bestimmte Sensoren, Aktoren, Access Points, Gateways, zentrale Elemente etc.). Deren Aufgaben, Art und Anzahl sollte möglichst genau festgelegt werden. Die Anzahl kann durch eine obere Schranke abgeschätzt werden, aus der sich eine worst case-Anforderung z.B. an die erforderliche Datenrate der Funktechnologie ergeben kann. Die Topologie des zu entwickelnden Netzes sowie der Datenfluss (unidirektional, bidirektional, beteiligte Knoten) sollte in diesem Schritt ebenfalls festgelegt werden. Daraus ergibt sich, ob Multi-hop-Kommunikation und adaptives Routing erforderlich sind und ob netzweite Mobilität von Zwischenknoten und/oder Endgeräten unterstützt werden muss. Zur Eingrenzung des Energiebedarfs sollte festgelegt werden, welche Elemente batteriebetrieben sein müssen und welche definitiv über das Stromnetz mit Energie versorgt werden.

### 2. Aufstellen von Anforderungen und Ausschlusskriterien

Aus der ersten groben Systemarchitektur können Anforderungen an die Funktechnologie formuliert werden. Es sollte definiert werden, welche Anforderungen die Funktechnologie in jedem Fall erfüllen muss und auf welche Features verzichtet werden kann. Die Anforderungen sollten gewichtet werden. Falls möglich, sollten auch Ausschlusskriterien definiert werden, mit deren Hilfe eine erste Vorauswahl durchgeführt werden kann.

Beispielsweise ergeben sich spezielle Anforderungen an die Skalierbarkeit des Systems oder Aussagen wie "Mobilität von Endgeräten ist zwingend erforderlich". Letzteres schließt standardisierte Systeme, die dies nicht unterstützen und die nicht proprietär erweitert werden sollen, aus. Zusätzliche Anforderungen sind z.B. der Energie- und Platzbedarf sowie eine evtl. erforderliche Standardkonformität des Systems.

### 3. Aufstellen von Einsatzszenarios und Ableiten von Detailanforderungen

Zur Erfassung der Detailanforderungen müssen einzelne konkrete Szenarios bzw. Anwendungsfälle identifiziert und beschrieben, sowie deren Wichtigkeit bewertet werden. Jeder Anwendungsfall kann andere Systemkomponenten beinhalten und andere Datenflüsse mit unterschiedlichen Anforderungen u.a. an zu übertragende Datenmenge, Reaktionszeit und Latenz umfassen.

Werden diese Detailanforderungen im nächsten Schritt miteinander kombiniert - wobei jeweils die härteste Anforderung als obere Schranke eingeht - ergeben sich Anforderungen an vielfältige Parameter, wie zum Beispiel:

- Datenrate
- Maximale Latenzzeiten
- Echtzeitfähigkeit
- Erzielbare Reichweite
- Maximaler Bedarf an Ressourcen (Hardware/ Software)
- Koexistenz mit anderen Funksystemen
- Netzwerktopologie (Punkt-zu-Punkt, Stern, Multi-hop)

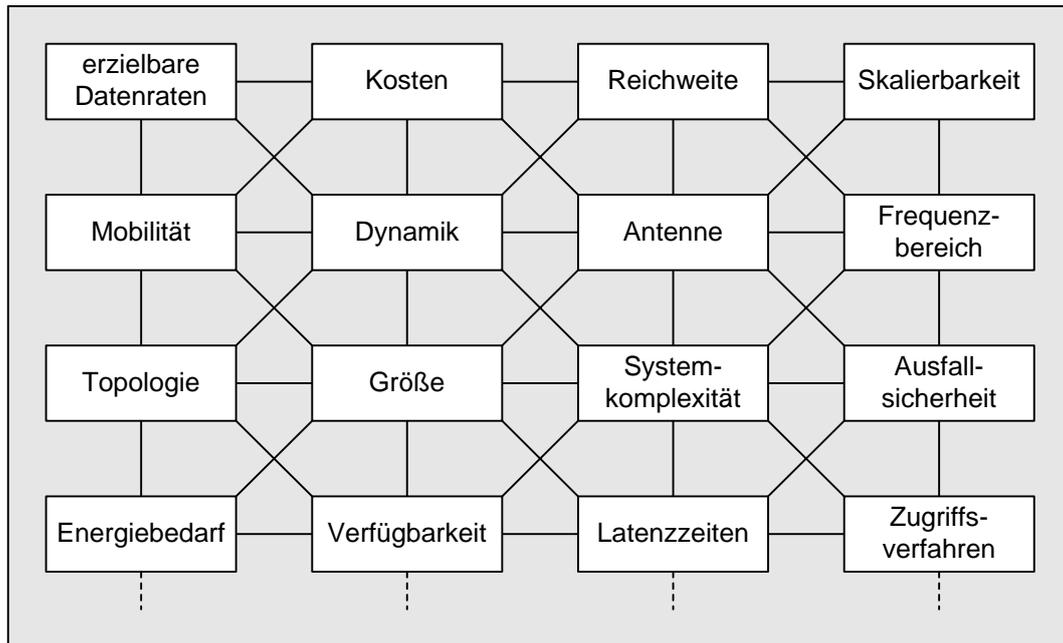
- Robustheit
- Skalierbarkeit
- Mobilitätsunterstützung
- Energiebedarf
- Verwendung von Sleep-Modes
- Platzbedarf
- Externe Beschaltung
- Kosten
- Standardkonformität
- Antennendesign
- Sendeleistung
- Frequenzband
- Kanalbandbreite
- Verfügbarkeit
- Systemkomplexität
- Ausfallsicherheit
- Dynamik

Es ist wahrscheinlich, dass dabei ein Zielkonflikt zwischen widersprüchlichen Anforderungen entsteht. Dieser kann basierend auf der Wichtigkeit des jeweiligen Anwendungsfalls mit Mitteln der Entscheidungstheorie [Zimm05] aufgelöst werden.

#### 4. Abbilden der Detailanforderungen auf die Leistungsmerkmale der Funktechnologien

Nach der Analyse der Anwendungsszenarios können die ermittelten Detailanforderungen auf die Fähigkeiten der in Frage kommenden Funktechnologien abgebildet werden.

Dabei ist darauf zu achten, dass die Funktechnologie nicht nur die einzelnen Detailanforderungen erfüllt, sondern insbesondere den Anforderungen in Kombination gerecht wird. Die Anforderungen befinden sich in einem Spannungsfeld (vgl. Abb. 1) und beeinflussen sich gegenseitig. Beispielsweise hat die Einführung von Sleep-Modes zur Erhöhung der Energieeffizienz einen Einfluss auf die erzielbaren Latenzzeiten oder die geforderte Datenrate hat aufgrund des zugrunde liegenden Modulationsverfahrens direkten Einfluss auf die maximale Reichweite des Systems.



**Abb. 1:** Spannungsfeld der Anforderungen

#### 5. Treffen einer begründeten Technologieauswahl

Oft wird keine der angebotenen Funktechnologien uneingeschränkt für das geplante System geeignet sein, so dass Kompromisse erforderlich sind. Die einzelnen Design-Optionen und Alternativen müssen gegenübergestellt und bewertet werden. In manchen Fällen kann eine Neubewertung der Wichtigkeit der Anwendungsfälle und eine Überprüfung und unter Umständen Umgestaltung der Systemarchitektur erforderlich sein. Letztlich ergibt sich aus der Abbildung der definierten Anforderungen unter Berücksichtigung der gegenseitigen Abhängigkeiten eine begründete Technologieauswahl.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Moderne energieeffiziente Funkssysteme sind ein wesentlicher Schritt zur Realisierung der Vision des pervasive computing. Bestehende Anwendungen können flexibler gestaltet werden und neue zukunftsweisende Anwendungsgebiete erschlossen werden.

Die Anzahl der verfügbaren Funktechnologien ist groß und deren Leistungsspektrum unübersichtlich. Die Auswahl der geeigneten Funktechnologien für ein bestimmtes Szenario ist ein wichtiger Grundbaustein im Entwicklungsprozess. Sie sollte möglichst durchdacht und strukturiert vorgenommen werden. Eine einmal getroffene Auswahl bindet den Entwickler an eine bestimmte Technologie, von der meist nur noch mit hohem Aufwand und Kosten abgewichen werden kann.

Neben dem Auswahlprozess gibt es eine Reihe weiterer Herausforderungen. Es ist wichtig, bereits beim Systementwurf auf die Anwenderfreundlichkeit, zum Beispiel in Form von zusätzlichen Mechanismen zur Selbstorganisation, Bedienunterstützung oder intelligenten Mensch-Maschine-Schnittstellen zu achten. Eine weitere Herausforderung stellt nach wie vor die Energieversorgung dar, auf die eine besondere Aufmerksamkeit gelegt werden muss.

Die Entwicklung drahtloser ubiquitärer Kommunikationssysteme macht gute Fortschritte. Entsprechende Technologien sind bereits in manchen Produkten integriert, der breite Marktdurchbruch ist jedoch noch nicht gelungen. Es bedarf noch viel an Forschungs- und Entwicklungsarbeit bis die Vision des pervasive computing unser alltägliches Leben durchdringt und auf breiter Basis angenommen wird.

## Literatur

- [Auge04] M. Augel, W. A. Heidrich, R. Knorr: An IP-based Bluetooth Multi-hop Network for Inhouse Communication. In: A. Ferscha, H. Hörtner, G. Kotsis: Advances in Pervasive Computing, Oesterreichische Computer Gesellschaft (2004) 259-264.
- [Blue04] Bluetooth Special Interest Group: Specification of the Bluetooth System, Version 2.0 (2004).
- [IEEE99] IEEE: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications (1999).
- [IEEE02] IEEE: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Wireless Personal Area Networks (2002).
- [IEEE03] IEEE: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (2003).
- [JoJo05] T. Jorgensen, N. T. Johansen: Z-Wave as Home Control RF Platform, Zensys Whitepaper (2005).
- [Perk01] C. E. Perkins: Ad Hoc Networking, Addison-Wesley Longman (2001).
- [Siko04] A. Sikora: Coexistence of IEEE802.15.4 (ZigBee) with IEEE802.11 (WLAN), Bluetooth, and Microwave Ovens in 2.4 GHz ISM-Band, Test Report V0.3 (2004).
- [ZigB04a] ZigBee Alliance: Network Specification, Revision 10, Version 1.00 (2004).
- [ZigB04b] ZigBee Alliance: ZigBee Application Framework Specification, Revision 6, Version 1.00 (2004).
- [Zimm05] H.-J. Zimmermann: Operations Research, Vieweg (2005) 12-32.