

# DIPLOMARBEIT

## Low Cost Remote Access Node

ausgeführt zur Erlangung des akademischen Grades  
eines Diplom-Ingenieurs unter der Anleitung von

o.Univ.Prof.Dr.techn. Dietmar Dietrich

und Univ.Ass.Dipl.-Ing.Dr.techn. Peter Palensky

als verantwortlich mitwirkendem Universitätsassistenten

am

Institut für Computertechnik (E384)

der Technischen Universität Wien

durch

Ing. Peter Karlich

Waldgasse 14, 7061 Trausdorf

Matr.Nr. 8526239

Wien, am 12. August 2004

.....



## **Kurzfassung**

Energiemanagement stellt für ein Unternehmen ein wichtiges Werkzeug im Rahmen der Kostenverwaltung dar. Durch eine genaue und detaillierte Betriebsdatenerfassung lassen sich mögliche Ansatzpunkte einer Energieeinsparung und damit einer Kostenreduktion erkennen. Einen wesentlichen Aspekt stellt in diesem Zusammenhang die zeitliche Korrelation von Verbrauchsdaten (z. B. Strom, Gas, Wasser, Wärme) und Zustandsdaten (z. B. Temperatur, Druck) dar. Solcherart Dienstleistungen, rund um Betriebsdaten, werden unter anderem von der Firma Envidatec GmbH angeboten, die auch hinter dem Thema dieser Diplomarbeit steht. Envidatec setzt zur Gewinnung der "Rohdaten" ein kabelgebundenes Sensornetzwerk ein, das einen großen finanziellen Overhead in Bezug auf Installation und Wartung mit sich bringt. Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde nun ein funkgestütztes Sensorsystem zur Erfassung von Verbrauchsdaten und Messwerten konzipiert. Dies wurde unter Einsatz von Ultra Low Power Funksensoren erreicht, die den batteriebetriebenen Betrieb über Jahre hinweg ermöglichen. Der Aufbau von Funksensoren, die Vorstellung des entsprechenden Funkprotokolls und die Kopplung des kompletten Funknetzwerkes an das Feldbussystem LonWorks werden in dieser Arbeit vorgenommen.

## **Abstract**

Energy management is an important tool for an enterprise in the context of cost administration. Exact and detailed process data are the basis for energy analysis and subsequent energy savings and cost reduction. The temporal correlation of consumption data (e.g. electricity, gas, water, heat) and measurement data (e.g. temperature, pressure) are a substantial aspect in this topic. Company Envidatec GmbH for instance offers such services around operational data and also initiated this diploma work. Envidatec uses wireline sensor networks for data acquisition which that cause significant costs when it comes to installation and maintenance. During this diploma work, a radio-based sensor system for collecting consumption and temperature data was developed. Ultra low power radio-sensors allow for a battery-powered operation over years. The structure of radio sensors, the introduction of the corresponding communication protocol and the interface between the radio network and the control network LonWorks are described in this thesis.



# Inhaltsverzeichnis

<b>ABKÜRZUNGEN.....</b>	<b>V</b>
<b>EINLEITUNG.....</b>	<b>1</b>
<b>GRUNDLAGEN .....</b>	<b>7</b>
2.1    DAS OSI REFERENZMODELL .....	7
2.1.1    DAS SCHICHTENMODELL.....	7
2.1.2    DIENSTE UND DIENSTOPERATIONEN .....	9
2.2    FUNKTECHNOLOGIEN .....	11
2.2.1    GRUNDLAGEN DER FUNKÜBERTRAGUNG .....	11
2.2.2    ANTENNEN .....	15
2.2.3    DAS ISM BAND.....	17
2.2.4    WLAN .....	18
2.2.5    BLUETOOTH.....	19
2.2.6    ZIGBEE .....	20
2.3    PHOTOVOLTAIK .....	22
2.3.1    PRINZIP DER SOLARZELLE .....	23
2.3.2    ENERGIESPEICHERUNG .....	27
<b>PROBLEMANALYSE .....</b>	<b>29</b>
3.1    KRITERIEN ZU EINEM LOW POWER BETRIEB.....	29
3.2    GESAMTSHEMA - TEILUNG DES PROJEKTES .....	31
3.3    S0-EINGÄNGE .....	35
3.4    DAS FUNKNETZWERK.....	36
3.5    KOMMUNIKATIONSSCHNITTSTELLEN .....	38
3.6    SYNCHRONISATION DER EINZELNEN KNOTEN .....	39
3.7    STROMVERBRAUCHSANALYSE .....	41
<b>REALISIERUNG .....</b>	<b>45</b>
4.1    VORGABEN .....	46
4.2    NETZWERK / KANALZUGRIFFSVERFAHREN .....	47
4.3    KOMMUNIKATIONSABLÄUFE / DATENSICHERUNG.....	48
4.4    ADRESSIERUNG UND ASSOZIATION .....	51
4.5    KOMMUNIKATIONSSCHNITTSTELLEN .....	54
4.5.1    SPI.....	55

4.5.2	UART .....	57
4.6	REALISIERTES SCHICHTENMODELL .....	59
4.7	DIENSTZUGANGSPUNKTE .....	60
4.7.1	APPLICATION INTERFACE.....	60
4.7.2	PLUG & PLAY LAYER .....	62
4.7.3	POWER MANAGEMENT LAYER .....	64
4.7.4	MEDIUM ACCESS CONTROL LAYER .....	65
4.7.5	PHYSICAL LAYER.....	68
4.8	RAHMENFORMATE.....	70
4.8.1	HÖHERE SCHICHTEN .....	70
4.8.2	SCHICHT 2 .....	71
4.8.3	SCHICHT 1 .....	73
4.9	ENTWICKLUNGSUMGEBUNG .....	74
4.9.1	SENDEMODUL .....	74
4.9.2	MESSMODUL.....	77
4.10	TEMPERATURSENSOREN .....	78
4.11	S0-EINGÄNGE .....	81
	<b>ERGEBNISSE / ANREGUNGEN .....</b>	<b>83</b>
	<b>LITERATUR.....</b>	<b>85</b>
	<b>INTERNETREFERENZEN .....</b>	<b>87</b>
	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>88</b>
	<b>TABELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>90</b>
	<b>ANHANG: SCHALTPLAN .....</b>	<b>91</b>

# Abkürzungen

2 PSK	Two Phase Shift Keying
ACK	Acknowledge
ACL	Access Control Lists
ADC	Analog Digital Converter
AES	Advanced Encryption Standard
AH	Anwendungsnachrichtenkopf
AI	Application Interface
APDU	Application Interface Protocol Data Unit
a-Si	Amorphes Silizium
ASK	Amplitude Shift Keying
BPSK	Binary Phase Shift Keying
CdTe	Cadmium-Tellurid
CEPT	Comitee on European Postal Regulations
CIGS	Kupfer-Indium/Gallium-Diselenid
CPCA	Carrier-Present Carrier-Absent
CRC	Cycle Redundancy Check
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CuInSe <sub>2</sub> oder CIS	Kupfer-Indium-Diselenid
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
EVU	Energieversorgungsunternehmen
FET	Feldeffekttransistor
FH oder FHSS	Frequency Hopping
FSK	Frequency Shift Keying
GaAs	Galliumarsenid
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications bzw. Group Special Mobile
HAL	Hardware Abstraction Layer
HDB3	High Density Bipolar of Order 3
HomeRF	Home Radio Frequency

I/O	Input/Output
ICI	Interface Control Information
Idle-RQ	Idle-Repeat-Request
IDU	Interface Data Unit
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISM	Industrial, Scientific and Medical
ISO	International Organisation for Standardization
ISP	In System Programming
ISR	Interruptserviceroutine
KFZ	Kraftfahrzeug
Li-Ion	Lithium-Ionen Akkumulator
MAC	Medium Access Control Layer
MPP	Maximum Power Point
MSK	Minimum Shift Keying
NiCd	Nickel-Cadmium Akkumulator
NiMH	Nickel-Metallhydrid Akkumulator
OC	Open Circuit
OOK	On-Off-Keying
OOSK	On-Off-Shift-Keying
OSI	Open System Interconnection
PAN	Personal Area Network
PaP	Plug & Play
Pb	Bleiakkumulator
PC	Personal Computer
PCB	Printed Circuit Board
PCI	Protocol Control Information
PDA	Personal Digital Assistant - ein Handcomputer
PDU	Protocol Data Unit
PSK	Phase Shift Keying
PURL	Protocol for Universal Radio Links
QAM	Quadratur Modulation
RISC	Reduced Instruction Set Computing
RSSI	Received Signal Strength Indicator
RTC	Real Time Clock
RZ	Return to Zero

SAP	Service Access Point
SC	Short Circuit
SDU	Service Data Unit
Si	Silizium
SIG	Bluetooth Special Interest Group
SP	Service Provider
SPI	Synchronous Peripheral Interface
SS	Spread Spectrum
STC	Standard Test Conditions
SU	Service User
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
WEP	Wired Equivalent Privacy
WLAN	Wireless Local Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network
XOR	Exklusiv-Oder Verknüpfung



# Kapitel 1

## Einleitung

In den letzten Jahren haben Geräte mit Funktechnologie eine rasante Verbreitung erfahren. Man denke nur an die Technik der drahtlosen Datenübertragung im PC-Bereich, sei es Geräte mit Wireless-LAN [WLAN] Technologie oder mit Bluetooth [Bluetooth], die den bis dato herrschenden Kabelsalat bei der Gerätevernetzung nun entscheidend zu entwirren helfen. Aber nicht nur in der Elektronischen Datenverarbeitung (EDV) ist ihr Siegeszug nicht mehr aufzuhalten, die mobile drahtlose Kommunikation per „Handy“ ist aus dem Alltag nicht mehr wegzudenken. Unübersehbar ist auch die Palette der vielen kleinen „Helferlein“ in der privaten Anwendung, z. B. Garagentoröffner, Zentralverriegelung beim Kraftfahrzeug (KFZ), Fernbedienung der KFZ-Standheizung, Signalweiterleitung im Heim-TV und -HiFi-Bereich um nur einige zu nennen, die die Funktechnologie anwenden.

Die Technik ist jedoch nicht neu, bereits im Jahr 1888 schrieb Heinrich Hertz<sup>1</sup> einen ausführlichen Forschungsbericht mit dem Titel „Über Strahlen elektrischer Kraft“. Wenige Jahre nach Heinrich Hertz Tod gelang es dem Italiener Guglielmo Marconi<sup>2</sup> und dem Russen Alexander Popov<sup>3</sup> eine Entfernung von einigen hundert Meter mit elektromagnetischen Wellen zu überbrücken, die ersten Worte die dabei von Popow 1896 telegraphisch übermittelt wurden, lauteten „Heinrich Hertz“.

Der Boom der letzten Jahre lässt sich auf den Preisverfall integrierter Halbleiterelemente zurückführen. Die Attraktivität mobiler und kabelloser Systeme und der damit verbundenen Minimierung von Installations- und Wartungskosten, ließ die Industrie schnell mit der Entwicklung funkgestützter Kommunikationssysteme reagieren.

Für die unterschiedlichen Anwendungen werden vielfältige Anforderungen bezüglich Datenrate, Datenschutz, Bandbreite, Sicherheit, Reichweite, Kosten und Installationsaufwand gefordert. Sind es im Bereich der PC-Datenkommunikation hohe Übertragungsraten, bestehen im Bereich der Heim- und Gebäudeautomation gänzlich andere. Die Aufgaben an die Systeme richten sich hier auf die periodische Übertragung von Sensordaten, z. B. Temperatur, Sonneneinstrahlung, Luftfeuchte bzw. die Umsetzung von Steuerbefehlen in Aktuatoren. Die dabei auftretenden Datenraten sind äußerst gering, die Sensor- und Aktuatorknoten sollen jedoch unauffällig und vor allem billig sein. Um eine Verkabelung zu umgehen ist ein Batteriebetrieb bzw. eine regenerative Energiegewinnung, beispielsweise durch Solarzellen und Piezokristalle, anzustreben und die Systeme dahingehend auf einen problemlosen, jahrelangen Betrieb auszulegen.

---

<sup>1</sup> Heinrich Rudolf Hertz, 1857-1894, deutscher Physiker, gilt als Entdecker der elektromagnetischen Wellen.

<sup>2</sup> Guglielmo Marconi, 1874-1937, Pionier der drahtlosen Telekommunikation, erhielt 1909 zusammen mit Ferdinand Braun (1850-1918) den Physiknobelpreis.

<sup>3</sup> Alexander Stepanovic Popov, 1859-1905, russischer Wissenschaftler, gilt als Erfinder des Radios im Jahr 1896, jedoch ließ sich Marconi die Erfindung nach einem Schema aus Popovs Publikationen patentieren, Popov wurde zwar auf dem Pariser Elektrotechnischen Kongress im Jahr 1900 geehrt, geriet aber in Vergessenheit.

### Auftraggeber / Umfeld des zu realisierenden Projektes

Die Aufgabe dieser Arbeit besteht in der Unterstützung eines konkreten Projektes der Firma Envidatec GmbH<sup>4</sup>, die sich mit Dienstleistungen rund um Betriebsdaten befasst. Konkret handelt es sich dabei um Verbrauchsdaten (Strom, Gas, Wasser, Wärme, Kälte, Druckluft...), Zustandsdaten (Temperaturen, Drücke, Betriebsstunden...) und weitere Betriebsdaten. Diese werden erfasst und ausgewertet, wobei u.a. eine Aufarbeitung der Daten mit unternehmensspezifischen Kennzahlen erfolgt. Die gewonnene Information wird per Internetportal dem Kunden online zur Verfügung gestellt und ermöglicht die rasche Anfertigung von Statistiken und Prognosen (Beispiel Abbildung 1-1). Tägliche, wöchentliche oder monatliche Übersichten von Betriebsdaten lassen sich schnell und komfortabel gewinnen. Mit den erfassten und ausgewerteten Daten besteht für den Kunden die Möglichkeit Betriebsabläufe zu optimieren und Kosten zu reduzieren. Durch die Protokollierung aller Daten besteht zudem jederzeit eine Kontrollmöglichkeit über die Funktion diverser Geräte. Filialbetriebe wie Supermärkte, Baumärkte oder Tankstellen aber auch Industriebetriebe zählen zu den von der Firma Envidatec GmbH betreuten Geschäftsbereichen.

Die Gewinnung der Daten wird derzeit noch mit kabelgebundenen Sensoren über ein Feldbussystem (LonWorks [Echelon]) durchgeführt. Ein Verwaltungssystem sammelt diese und übermittelt sie anschließend periodisch per digitalem Modem über eine Telefonleitung an eine Datenbank, wo die Sammlung und weitere Aufarbeitung durchgeführt wird. Der dabei notwendige Aufwand in Bezug auf Installation und Wartung ist sehr hoch. Den negativsten Aspekt dabei stellt vor allem die Verkabelung der notwendigen Sensoren zur Ermittlung von Verbrauchs- und Zustandsdaten dar. Abbildung 1-2 zeigt beispielsweise ein typisches Umfeld für den Einsatz von Temperatursensoren.

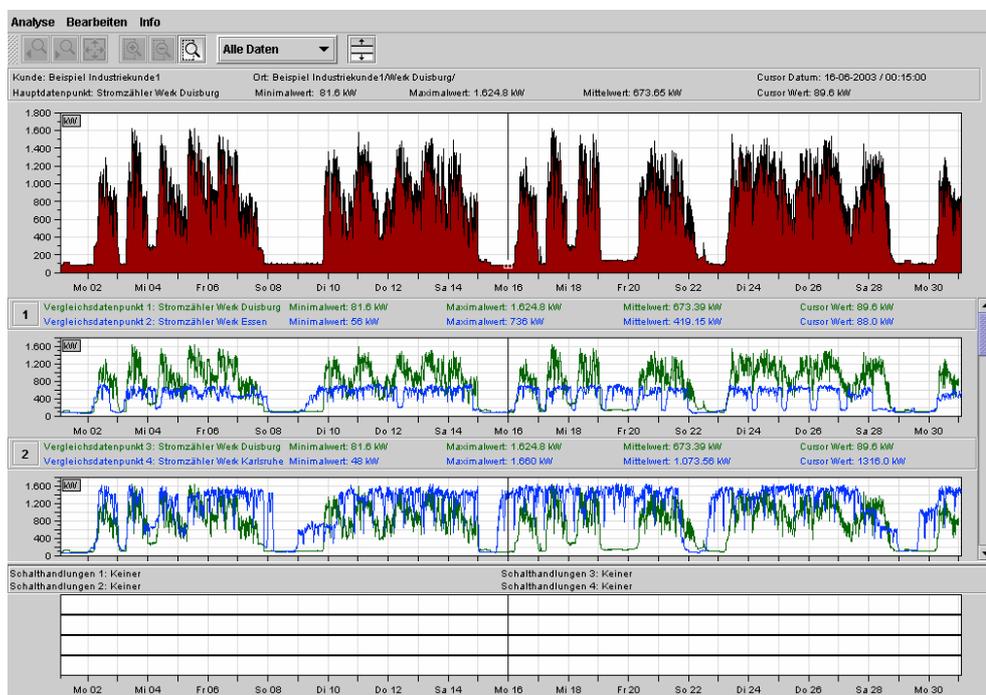


Abbildung 1-1: Graphische Darstellung gewonnener Verbrauchs- bzw. Zustandsdaten

<sup>4</sup> ENVIDATEC GmbH - Zentrale: Veritaskai 3, D-21079 Hamburg, www.envidatec.de

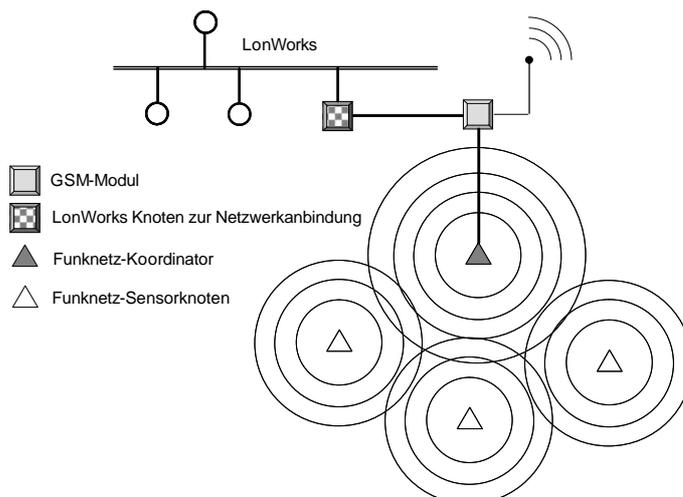


*Abbildung 1-2: Kühlzeile eines Supermarktes*

### **Aufgabenstellung**

Die konkrete Aufgabenstellung besteht in der Entwicklung eines Funknetzwerkes zur Erfassung und Weiterleitung von Verbrauchs- und Zustandsdaten. Dazu sollen Funkknoten entwickelt werden, die einerseits Temperaturdaten erfassen können und andererseits Impulse bestehender Mengenzähler (Strom, Gas, Wasser, Wärme, Kälte, Druckluft) aufnehmen sollen. Die so gewonnen Daten sollen gesammelt und zu guter letzt über ein GSM-System drahtlos an die schon erwähnte Internetdatenbank gesendet werden. Die Anzahl der dabei notwendigen Sensorknoten soll sich dabei auf mindestens 32 im Falle der Temperaturerfassung und vier zur Impulszählung belaufen, eine obere Grenze wurde nicht festgelegt. Das System soll günstig in der Realisierung sein und einen wartungsfreien Betrieb auf Jahre gewährleisten. Die Zeitspanne zur Impulserfassung der Mengenzähler soll mit dem Synchronisationsimpuls (alle 15 Minuten) des jeweiligen Energieversorgungsunternehmens (EVU) gekoppelt werden, während die Temperaturdaten periodisch alle fünf Minuten bzw. bei Überschreiten einer einstellbaren Werteschwelle erfasst werden sollen. Die Impulszähleingänge sind dabei auf den S0-Standard [S0] für Mengenzähler zu dimensionieren. Zu prüfen ist in diesem Zusammenhang, ob eine autarke Energieversorgung, bei Einsatz in Gebäuden, in Form von Solarzellen möglich ist. Die Sammlung der Daten kann über einen Zeitraum von zumindest einem Tag erfolgen und soll über ein GSM-System übermittelt werden. In vielen Fällen existiert bereits ein Feldbussystem in Form eines LonWorks Netzwerkes. Eine Anbindung des Funkknotennetzes mit der Möglichkeit dieses über das Lon-Netz, z. B. mit einem Laptop, zu konfigurieren, gilt es ebenfalls zu prüfen.

In Abbildung 1-3 ist das Schema des Netzwerkes skizziert. Ein dauernder Funkverkehr ist nicht notwendig und in Bezug auf die gesetzte Lebensdauer der Knoten mit derzeit erhältlichen Halbleitern auch nicht möglich. Der einzuhaltende S0-Standard der Impuls-eingänge lässt einen Batteriebetrieb an dieser Stelle nicht zu, ist bei den meisten Konfigurationen auch nicht notwendig. Die Mengenzähler befinden sich zueinander meist in direkter räumlicher Nähe, wobei auch eine Verkabelung über kurze Distanzen zu den S0-Eingängen sowie eine Energieversorgung über das Netz in diesen Räumlichkeiten kein allzu großes Problem darstellt. In der gleichen Art ist der Synchronimpuls der EVUs abzunehmen und dem System zuzuführen. Einzig der Wassermengenzähler ist oftmals in einiger Entfernung angebracht und direkt nicht erreichbar. Hier überprüft ein anderer Diplomand die Möglichkeit der Datenübertragung über die Wasserleitungen [BACH03].



*Abbildung 1-3: Schema zur Aufgabenstellung*

### **Inhaltsüberblick**

Der erste Teil dieser Ausfertigung widmet sich im Kapitel 2 theoretischen Grundlagen. Hier wird das OSI-Referenzmodell zur strukturierten Protokollentwicklung vorgestellt, mit einer Erläuterung der Notwendigkeit und dem Strukturaufbau von Protokollschichten zur Netzwerkentwicklung. Ein weiterer Aspekt gilt den Grundlagen der Funktechnologie, wobei auch auf die Antennentechnologie eingegangen wird. Als Anwendung zur Funktechnologie werden Vertreter zur Datenkommunikation im lizenzfreien ISM-Band vorgestellt. Ein sich im Entstehen befindlicher Standard zu „low cost“, „low power“ und „low data rate“ Funkkommunikation, ZigBee, wird ebenfalls hier kurz notiert. Grundlagen zur Photovoltaik, deren Verwendung sowie die Erklärung zusätzlicher Elemente zur Energiespeicherung bilden schließlich den abschließenden Teil des Kapitels.

Kapitel 3 ist der Analyse der einzelnen zu realisierenden Projektschwerpunkten gewidmet. Erläutert werden die erforderlichen Maßnahmen, die einen low power Betrieb von Funkknoten erst ermöglichen. Ausgehend von der ursprünglichen Aufgabenstellung werden die Gründe dargelegt, die zu einer Aufteilung des Gesamtkonzeptes in zwei eigenständigen Arbeiten mündete. Mit der Realisierung des Funksensorknotensystems beschäftigt sich der verbleibende Teil dieser Arbeit. Die Anbindung des Sensorsystems sowie die Datenweiterleitung per GSM-Modul stellen einen eigenständigen Projektteil dar und wurden an einen weiteren Diplomanden vergeben. In weiterer Folge wird das notwendige Sensorsystem vorgestellt und der Aufbau des Funknetzwerkes konzipiert. Notwendige Kommunikationsschnittstellen zum Datenaustausch innerhalb eines Knotens als auch der Mechanismus zur Synchronisation der Knoten mit einer Basisstation werden erläutert. Den Abschluss des Kapitels bildet schließlich eine Stromverbrauchsanalyse.

Die Realisierung des Funknetzes stellt den Inhalt des Kapitels 4 dar. Ausgehend von den Vorgaben wird die Funknetztopologie vorgestellt und das realisierte Medienzugriffsverfahren erklärt. Mechanismus und Vorgang der Adressierung als auch Assoziation der einzelnen Knoten sowie Kommunikationsabläufe und Maßnahmen zur Datensicherung werden ausführlich dargelegt. Der genaue Aufbau notwendiger Kommunikationsschnittstellen als auch das realisierte OSI-Schichtenmodell mit den verwendeten Rahmenformaten werden erläutert. Das Kapitel beinhaltet weiters sowohl eine Vorstellung der bei der Realisierung verwendeten Entwicklungsumgebungen sowie Programmierwerkzeugen und endet mit der detaillierten Behandlung der verwendeten Sensorsystemen.

Eine Präsentation der Ergebnisse und ein kurzer Hinblick auf Erweiterungsmöglichkeiten bilden schließlich den Abschluss dieser Arbeit.



# Kapitel 2

## Grundlagen

### 2.1 Das OSI Referenzmodell

Das Open System Interconnection Referenzmodell, kurz OSI-Modell [TAN03] [HEN92] [DIE99], der International Organisation for Standardization, ISO, stellt ein wesentliches und häufig genutztes Modell zur Beschreibung moderner Kommunikationsnetze dar. Die Einteilung des OSI-Modells in sieben Schichten wurde unter verschiedensten Gesichtspunkten getroffen. Jeder einzelnen Schicht wurde eine genau definierte Funktion zugewiesen, die Definitionen international genormter Protokolle wurden dabei berücksichtigt. Eine neue Schicht entstand dort, wo ein neuer Abstraktionsgrad benötigt wurde, die Grenze zwischen den Schichten wurde jedoch auch derart gezogen, dass der Informationsfluss über die Schnittstellen möglichst gering ist. Zu guter Letzt musste ein Kompromiss über die Anzahl der Schichten getroffen werden, die einerseits so groß sein sollte unterschiedliche Funktionen nicht in einer Schicht zusammenwürfeln zu müssen und andererseits so klein, dass die gesamte Architektur nicht unhandlich wird.

Das OSI-Modell selbst ist keine Netzarchitektur, die in den Schichten beschriebenen Dienste und Protokolle gibt es im Detail nicht, es beschreibt lediglich welche Aufgaben die einzelnen Schichten ausführen sollen. Die Zuordnung einzelner Komponenten eines Netzwerks zu den sieben Schichten des Modells erleichtert nicht nur die Analyse einer Netzwerkarchitektur, sondern gibt auch Hilfestellung bei der Lösung von Problemen im Bereich der Verbindung von Netzwerken, der so genannten Interconnection. Dies gilt auch für herstellereigene, proprietäre, Netzwerke.

Im Folgenden werden die einzelnen Schichten des Modells erläutert und im Anschluss die Kommunikation untereinander und den einzelnen Endanwendern dargelegt.

#### 2.1.1 Das Schichtenmodell

Die sieben Schichten sind in Abbildung 2-1 dargestellt, wobei die deutschen und die englischen Bezeichnungen angeführt sind.

Wie funktioniert nun eine Kommunikation zwischen den beiden Anwendungsprozessen? Beispielsweise sollen Daten vom Prozess 1 zum Empfängerprozess 2 übermittelt werden. Dazu übergibt der Senderprozess, in unserem Fall der Anwenderprozess 1, die Daten an die Anwendungsschicht, die sie zusammen mit dem Anwendungsnachrichtenkopf AH an die Darstellungsschicht weitergibt. Der Nachrichtenkopf (Header) dient zur Abwicklung des Protokolls der Anwendungsschicht. Die Darstellungsschicht sieht die Kombination aus AH und Daten als eine Einheit an und führt auf ihr die spezifischen Operationen aus, insbesondere wird die Dateneinheit um den Nachrichtenkopf der Darstellungsschicht ergänzt und an die Sitzungsschicht übergeben. Analog wiederholt sich dieser Vorgang solange auf die tiefer gelegenen Schichten, bis die Daten die Bitübertragungsschicht er-

reichen, von der aus sie tatsächlich über das Übertragungsmedium<sup>5</sup> die Empfängermaschine erreichen. Dort bewegt sich die Nachricht durch die verschiedenen Ebenen nun von unten nach oben, wobei die verschiedenen Nachrichtenköpfe wieder entfernt werden, bis schließlich die eigentlichen Daten den Empfängerprozess, den Anwenderprozess 2, erreichen. Der logische Datenfluss im OSI-Referenzmodell ist dabei horizontal, d.h. die einzelnen Schichten der einzelnen Prozesse kommunizieren scheinbar direkt mit dem Vertreter der gleichen Ebene des Partnerprozesses (dargestellt durch die strichlierten Linien in der Abbildung 2-1). Der tatsächliche Datenfluss erfolgt jedoch vertikal.

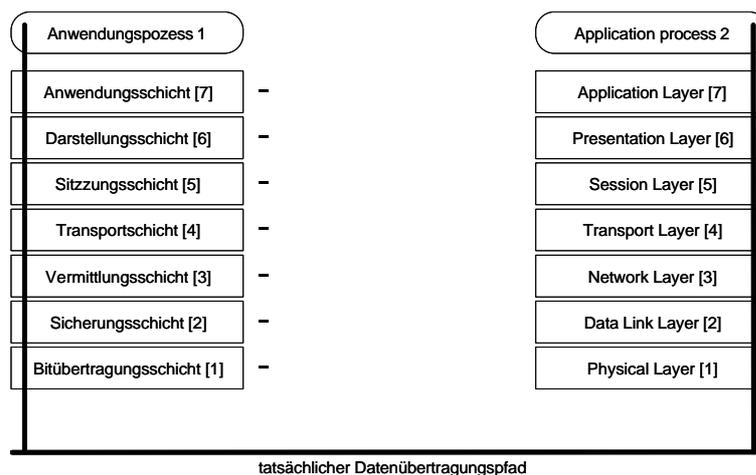


Abbildung 2-1: Die Schichten des OSI-Referenzmodells

Die **Bitübertragungsschicht** übernimmt die Übertragung eines Bitstroms über das physikalische Medium. Die Fragestellungen, die hier behandelt werden, beschäftigen sich weitgehend mit mechanischen (Anzahl der Pins einer Steckerbelegung und deren Bedeutung), elektrischen (die Spannungspegel, die Dauer eines einzelnen Bit) und prozeduralen (wie kommt eine Verbindung zum Medium zustande, bzw. wird sie aufgelöst usw.) Schnittstellen mit dem physikalischen Übertragungsmedium.

Die wichtigste Aufgabe der **Sicherungsschicht** ist es eine reine Übertragungseinrichtung in eine Leitung zu verwandeln, die sich der Vermittlungsschicht frei von unerkannten Übertragungsfehlern darstellt. Dazu werden die Daten in Datenrahmen (Data Frames) aufgeteilt, typisch sind einige hundert bis einige tausend Byte, und diese sequentiell übertragen. Im Gegenzug werden vom Empfänger zur Empfangsbestätigung Bestätigungsrahmen (Acknowledgement Frame) zurückgesendet. Probleme mit der die Sicherungsschicht umgehen muss, sind verloren gegangene, beschädigte oder duplizierte Rahmen und die Flusskontrolle. Die Konkurrenz zwischen Daten- und Bestätigungsrahmen bei Zugriff auf einen gemeinsamen Übertragungskanal wird oft durch eine Zwischenschicht, der Mediumzugriffssteuerungsschicht (Medium Access Control Layer, MAC-Layer) gelöst.

Die **Vermittlungsschicht** befasst sich im Besonderen mit der Wegwahl (Routing), dem Aufbau eines Pfades zwischen zwei Endsystemen, der Übertragung, dem Gebrauch von Zwischensystemen um den Datenfluss von einem Teilnetz zum anderen zu ermöglichen. Die Dienste, die die Vermittlungsschicht der Transportschicht anbietet, verstecken vor ihr

<sup>5</sup> Das OSI-Referenzmodell sagt nichts über das Übertragungsmedium aus, dieses hängt von der Art der Implementierung ab und kann über Kabel, Glasfaser oder Funk erfolgen.

die Anzahl und die Eigenschaften der Teilnetze, die in der Kommunikation verwendet werden.

Die **Transportschicht** übernimmt Daten von der Sitzungsschicht, zerlegt diese gegebenenfalls in kleinere Einheiten, gibt sie weiter an die Vermittlungsschicht und stellt sicher, dass alle Teile richtig am anderen Ende ankommen. Dies alles muss außerdem effizient und in einer Weise erfolgen, dass die oberen Schichten von unvermeidbaren Änderungen der Hardware-Technik abgeschirmt werden. Sie bestimmt auch die Art des Dienstes, der der Sitzungsschicht, und damit letztlich dem Endbenutzer, zur Verfügung gestellt wird. Die gebräuchlichste Art der Transportverbindung ist ein fehlerfreier Punkt-zu-Punkt-Kanal. Die Transportschicht ist eine echte Endpunkt-zu-Endpunkt-Schicht, von der Quelle bis zum Ziel.

Als Sitzung wird die Verbindung zweier Teilnehmer/Anwendungen in einem Netz bezeichnet. Die **Sitzungsschicht** (auch Kommunikationssteuerungsschicht) erbringt die Dienste, die für den Beginn, die Durchführung und den Abschluss einer solchen Sitzung benötigt werden. Dazu zählen die Identifizierung der Teilnehmer und die Überprüfung der Berechtigung beider für die gewünschte Kommunikation. Weitere Aufgaben sind Synchronisation und Transaktionssteuerung. Für verbindungslose Kommunikation ist die Sitzungsschicht nicht notwendig.

Die **Darstellungsschicht** hat die Syntax und die Semantik der übertragenen Information zum Inhalt. Sie fungiert damit als Dolmetscher zwischen den Teilnehmern und dem Netz. Dadurch können auch heterogene Systeme miteinander kommunizieren. Weitere Funktionen wären Datenreduktion und -kompression, als auch Verschlüsselung oder Anpassung der Dateiformate.

Die **Anwendungsschicht** schließlich bietet dem Benutzer, bzw. den Anwendungen alle Voraussetzungen für die Kommunikation mit einem Partner. Typische Dienste, die angeboten werden sind Dateitransfer, das Nutzen entfernter Rechner, E-Mail, Verzeichnis- und Namensdienste, Datenaustausch, Informationsdienste, usw.

### 2.1.2 Dienste und Dienstoperationen

Die aktiven Elemente einer Schicht heißen Instanzen (Entities), wobei eine Instanz in Soft- oder Hardware realisiert sein. Instanzen auf derselben Schicht auf verschiedenen Maschinen heißen Partnerinstanzen (Peer Entities).

Wie greift nun eine Schicht der Ebene N auf Dienste der darunter liegenden Schicht, der Ebene N-1, zu. Die Schicht N-1 fungiert hier als Dienstbringer (Service Provider, SP), die Schicht N ist der Dienstbenutzer (Service User, SU). Für die Bereitstellung der Dienste macht sich die Schicht N-1 die Dienste der Schicht N-2 zunutze. Dienste sind an den Dienstzugangspunkten (Service Access Point, SAP) verfügbar. Die SAP der Schicht N-1 sind die Stellen, an denen die Schicht N die angebotenen Dienste in Anspruch nehmen kann.

Damit zwei Schichten Information austauschen können, muss ein vereinbarter Satz von Regeln die Schnittstelle beschreiben. Typischerweise gibt eine Instanz der Schicht N eine Schnittstellendateneinheit (Interface Data Unit, IDU) über den SAP an die Instanz der Schicht N-1 weiter. Die IDU besteht aus einer Dienstdateneinheit (Service Data Unit, SDU) und der Steuerinformation (Interface Control Information, ICI). In der Schicht N-1 wird nun die ICI decodiert und ein entsprechender Prozess eingeleitet.

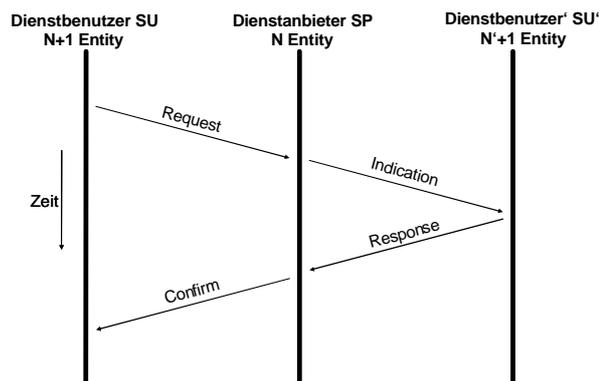
Für die Übertragung wird die Instanz der Schicht N-1 die SDU möglicherweise aufteilen müssen. Jeder dieser Fragmente wird dann eine Protokollkontrollinformation (Protocol

Control Information, PCI) vorangestellt und dann als Protokolldateneinheit (Protocol Data Unit, PDU) in einem Paket übertragen. Erst die Schicht 1 überträgt die Information schließlich physikalisch.

Die Dienstinstanzen der Schichten bilden eine Hierarchie, der Datenfluss ist vertikal von SAP zu SAP.

Jede Schicht des OSI-Referenzmodells enthält nun eine Protokollspezifizierung, die die Definition von Funktionen und der PDU enthält. Weiters enthält sie eine Dienstdefinition, die beschreibt, welche Funktionen dem Service User zur Verfügung stehen. Diese werden Dienstelemente genannt und verfügen ihrerseits über eine bestimmte Anzahl von Dienstprimitiven. Mögliche Klassen davon sind:

- Anforderung (**Request**): Anforderung einer Leistung von einer tiefergelegenen Schicht.
- Ankündigung (**Indication**): Information über ein bestimmtes Ereignis
- Antwort (**Response**): Antwort auf ein bestimmtes Ereignis
- Bestätigung (**Confirm**): Bestätigung über eine erbrachte Leistung



*Abbildung 2-2: Interaktions Zeit Schema eines bestätigten Dienstes*

Abbildung 2-2 zeigt das Schema eines bestätigten Dienstes, der beispielsweise wie folgt ablaufen könnte: Der Dienstbenutzer der Senderseite stellt eine Anforderung (Request) an den Dienstanbieter der darunter liegenden Schicht, z. B. der Bitübertragungsschicht, zum Übertragen eines Datenrahmens. Der Datenrahmen wird daraufhin übertragen und dem Dienstbenutzer' der Empfangsseite angezeigt (Indication). Bei einem bestätigten Dienst wird demnach vom Dienstbenutzer' der Empfangsmaschine eine Antwort (Response) über den Empfang des Rahmens formuliert und diese wiederum übertragen. Zu guter Letzt erhält der Dienstbenutzer der Sendemaschine eine Bestätigung (Confirm) über die wie auch immer erfolgte Übertragung des Datenrahmens. Bei einem unbestätigten Dienst würden die beiden Dienstoperatoren Response und Confirm entfallen.

## 2.2 Funktechnologien

Der Einsatz von Geräten mit Funktechnologie ist allgegenwärtig. Beginnend mit der Übertragung von Musik und Sprache zum Radioempfänger über den Empfang von TV, erdgebunden oder über Satellit bis hin zu den modernen Formen der mobilen Kommunikation. Eine Fülle von Kleingeräten wie Garagentoröffner, Temperatursensoren, Türöffner für KFZ um nur einige zu nennen, lassen schon den größten Vorteil der Funkübertragung, die drahtlose und damit flexible Übertragung von Information erkennen. Aber nicht nur die hohe Mobilität, auch geringe Installations- und Wartungskosten, keine umfangreiche Verkabelung mehr, haben den Siegeszug der Funktechnologie begründet. Die Funkübertragung birgt jedoch auch Nachteile. Durch die hohe Verbreitung ist naturgemäß die Anzahl von Störquellen zu einer Funkübertragung entsprechend gewachsen, die Zuverlässigkeit in Bezug auf verkabelte Systeme ist geringer. Um dennoch für eine zuverlässige Übertragung zu sorgen ist ein erheblicher Aufwand bei der Implementierung insbesondere bei der Protokollentwicklung notwendig.

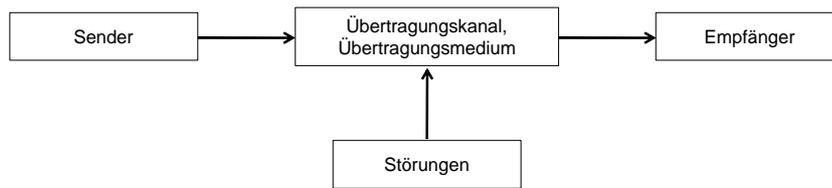
Im Folgenden werden die Grundlagen der Funkübertragung kurz umrissen und verschiedene Typen von Antennen, dem Sprachrohr der Funktechnologie, erörtert. Das lizenzfreie ISM-Band wird vorgestellt, sowie Vertreter der mobilen Datenkommunikation, das WLAN und Bluetooth, sowie ein im Entstehen begriffener neuer Standard, Zigbee.

### 2.2.1 Grundlagen der Funkübertragung

Das Ziel einer Nachrichtenübertragung ist es, Information verschiedenster Art, sei es Sprache, Daten, Musik usw., über einen vorgegebenen Übertragungskanal (z. B. Glasfaser, Kabel, Funk) möglichst schnell und vor allem möglichst sicher zu übertragen. Im Fall der analogen Signale (Musik, Sprache) ist man interessiert die Übertragung verzerrungs- und störungsfrei zu gestalten, während man bei digitalen Signalen möglichst fehlerfrei übertragen möchte [WEI98].

In Abbildung 2-3 ist ein einfaches Modell zur Übertragung von Nachrichten dargestellt. Ein Sender übermittelt Informationen über einen Übertragungskanal, ein Übertragungsmedium, an einen Empfänger. Das Nutzsignal erfährt dabei eine Veränderung durch additiv überlagerte Störungen. Das hier gezeigte Schema beschränkt sich auf nur eine Richtung der Informationsübertragung. Eine Bestätigung beim Sender über die erfolgreiche Ankunft der gesendeten Nachrichten ist hier unmöglich, jedoch wäre eine Erweiterung auf eine bidirektionale Verbindung denkbar.

Entscheidenden Einfluss auf die Qualität der Übertragung kommt den Eigenschaften des Übertragungskanals zu. Man unterscheidet dabei die verfügbare Bandbreite und die Höhe der Rauschleistung. Die Bandbreite  $B_0$  kennzeichnet die Breite des Frequenzbereiches in dem eine Übertragung über das jeweilige Übertragungsmedium möglich ist. Beispielsweise stellt die Post bei einem analogen Telefonkanal einen Frequenzbereich von 300 Hz bis 3400 Hz, damit einer Bandbreite von  $B_0 = 3100\text{Hz}$  zur Verfügung. Die Höhe der Rauschleistung wird üblicherweise als Verhältniszahl Nutzsignalleistung zu Rauschleistung am Kanal als Signal zu Rauschverhältnis (Signal to Noise Ratio, SNR) angegeben.



**Abbildung 2-3: Blockschaltbild einer Nachrichtenübertragung**

Im Falle des analogen Telefonkanals etwa ein Wert von  $10^3$ . Im Jahre 1948 hat Claude Shannon<sup>6</sup> gezeigt, dass im Prinzip Information störungsfrei über einen bandbegrenzten, durch additives Rauschen gestörten Kanal übertragen werden kann, solange die Geschwindigkeit der Informationsübertragung (gemessen in Bit/Sekunde) kleiner als die so genannte Kanalkapazität  $C$  ist. Diese errechnet sich zu:

$$C = B_0 \cdot \ln(1 + SNR) \quad [\text{WEI98}] \qquad \text{Formel 2-1}$$

Im Fall des oben angeführten analogen Telefonkanals ergibt sich daraus eine Kanalkapazität von etwa 31000Bit/Sekunde. Die Kanalkapazität liefert eine fundamentale Grenze der möglichen Übertragungsgeschwindigkeit und damit einen wichtigen Hinweis für die Qualität eines tatsächlich realisierten Übertragungsverfahrens.

Wie schon erwähnt wird zur Informationsübertragung ein Sender und Empfänger benötigt. Dies geschieht durch **Modulation**, deren wichtigster Aspekt die Verschiebung des Nutzspektrums zu höheren Frequenzen ist.

Dies bringt folgende Vorteile:

- Hohe Frequenzen können leichter abgestrahlt werden (bei Funkübertragung führt dies zu kleineren Antennen)
- Modulation mit verschiedenen Trägerfrequenzen erlaubt die Übertragung mehrere Signale über denselben Kanal (das so genannte Frequenz-Multiplex)
- Anpassung der Übertragung an die Eigenschaften des Übertragungskanals (minimale Verluste)
- Reduktion von Störungen und Überlagerungen im Kanal

Der umgekehrte Vorgang zur Modulation heißt Demodulation und wird im Empfänger zur Rückgewinnung des Nutzspektrums durchgeführt. Folgende Modulationsverfahren finden bei der Übertragung von digitalen Signalen Verwendung:

**On-Off-Keying (OOK):** Eine Trägerschwingung wird dabei im Takt des binären Nutzspektrums ein- und ausgeschaltet. Dies bewirkt eine Verschiebung des Signalspektrums zur Trägerfrequenz. Andere Bezeichnungen dafür sind Amplitude Shift Keying (ASK), On-Off-Shift-Keying (OOSK) oder Carrier-Present Carrier-Absent (CPCA).

**Frequency Shift Keying (FSK):** Hier wird jeweils eine Trägerfrequenz für die binäre 0 und eine für die binäre 1 des Nutzspektrums geschaltet. Das entstehende Signal kann daher als Überlagerung zweier OOK-Modulationen betrachtet werden und resultiert aus zwei Anteilen der jeweiligen Trägerfrequenzen. Deren Abstand muss dabei mindestens der doppelten Signalfrequenz sein um die Bitfehlerrate nicht zu verschlechtern. Man spricht

<sup>6</sup> Claude Elwood Shannon, 1917-2001, Mathematiker, gilt als Begründer der Informationstheorie

in diesem Fall auch von Minimum Shift Keying (MSK). Die benötigte Bandbreite ist damit erheblich größer als bei OOK.

**Phase Shift Keying (PSK):** Bei Verwendung nur einer Trägerfrequenz geschieht die Modulation hier mit Umschaltung der Phasenlage des Trägers. Werden die Phasenlagen  $0^\circ$  und  $180^\circ$  verwendet, spricht man auch von Binary Phase Shift Keying (BPSK) oder Two Phase Shift Keying (2 PSK). Das benötigte Trägerspektrum entspricht dem der OOK.

Zur Erhöhung der Übertragungsgeschwindigkeit werden auch Kombinationen von OOK und PSK eingesetzt, der Quadratur-Modulation (QAM). Dadurch vervielfacht sich die Anzahl der zur Verfügung stehenden Zeichen. Benutzt man z. B. vier verschiedene Amplituden und vier verschiedene Phasen, so stehen 16 verschiedene Zeichen zur Verfügung, d.h. es können 4 Bits auf einmal übertragen werden. Diese Modulation nennt man dann auch 16 QAM. In der Praxis werden die Modulation 16 QAM und 64 QAM benutzt. Die Quadratur Modulation erbt die Nachteile der Amplitudenmodulation, d.h. das Signal muss zur Auswertung der Abstufungen der Amplituden normiert werden und die Reichweite ist geringer als bei PSK und FSK.

Nach den Methoden zur Modulation sollen an dieser Stelle noch Verfahren zur Störungsbekämpfung kurz erläutert werden. Überträgt man Informationen mittels Funkwellen, so geschieht dies üblicherweise in einem schmalen Bereich um einer festen Trägerfrequenz (Schmalbandkommunikation). Diese Verbindung kann absichtlich oder unabsichtlich leicht gestört werden. Überträgt man die gleiche Information jedoch über ein breiteres Frequenzband, so wirken sich einzelne Störquellen weit aus weniger gravierend auf die Übertragung aus. Da das Spektrum der benutzten Funkwellen nun gegen über der Schmalbandkommunikation künstlich verbreitert wurde, bezeichnet man diese Methode als Spread Spectrum (SS). Die einfachste Spread Spectrum Methode ist das Frequenzsprungverfahren, Frequency Hopping (FH oder FHSS). Das Frequency Hopping unterscheidet sich von der Schmalbandkommunikation dadurch, dass in regelmäßigen Abständen (20-400 ms sind üblich) die benutzte Frequenz nach einem Schema (dem Hopping Plan) gewechselt wird. Der Hopping Plan muss natürlich nicht nur dem Sendern sondern auch dem Empfänger bekannt sein. Wird beim Hopping auf eine „schlechte“ Frequenz gewechselt, auf der aufgrund von Störungen keine Verbindung möglich ist, dann ist die Kommunikation nur so lange unterbrochen, bis auf eine ungestörte Frequenz gewechselt wird. Zur Optimierung der Übertragungsleistung ist es denkbar, dass der Hopping Plan dynamisch geändert werden, so dass schlechte Frequenzen weniger oft angesprungen werden als gute. Ganz aus dem Plan sollte man sie jedoch nicht nehmen, da zu einem späteren Zeitpunkt die Verbindung auf diesen Frequenzen wieder besser werden könnte.

Beim Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) wird das Spektrum auf eine andere Weise gespreizt: Der Datenstrom wird mit einer Sequenz Exklusiv-Oder (XOR) verknüpft, die aus der Wiederholung einer wesentlich höherfrequenten Zufallsbitfolge besteht. Da durch diese Verknüpfung die Datenrate des Signals vervielfacht wird, ergibt sich nach der Modulation auch eine Verbreiterung des Spektrums bzw. eine Vergrößerung der Bandbreite. Aufgrund der gegenüber FHSS wesentlich höheren Signalraten stellt DSSS höhere Anforderungen an den Sender und Empfänger. Außerdem müssen beim Empfänger die Daten aus dem DSSS-Signal mit Hilfe eines so genannten Matched Filter Correlator wieder gewonnen werden, wohingegen ein FHSS-Empfänger das Signal nur noch zu demodulieren braucht. Dafür kommt DSSS mit leichten Störungen besser zu Recht, da aufgrund der vielfachen Redundanz das Signal komplett ohne Verluste wieder hergestellt werden kann, wohingegen bei FHSS die komplette in dem

gestörten Hop übertragene Information verloren gehen. Bei stärkeren Störungen, die sich im Falle von DSSS über einen Großteil der Bandbreite des gespreizten Signals auswirken, ist mittels DSSS allerdings kaum noch eine Kommunikation mehr möglich. Da FHSS aber über das ganze nutzbare Frequenzband springt, kann FHSS auch diese Störung umspringen.

Der Datenverkehr per Funk wird im Allgemeinen asynchron übertragen. Das bedeutet, dass Beginn und Ende eines jeden übertragenen Datenbits am Empfänger nicht durch ein eigenes Taktsignal, wie bei der synchronen Übertragung angezeigt werden. Bei der Übertragung muss also einerseits sichergestellt werden, dass der Empfänger die Taktrate des Nutzsymbols einwandfrei erkennen und andererseits Beginn und Ende der Übertragung detektieren kann. Der Start wird dem Empfänger durch eine so genannte Preamble angezeigt. Nun muss der Empfänger das Eingangssignal zu geeigneten Zeitpunkten abtasten und daraus die übertragene Information erkennen. Das ist prinzipiell nur dann möglich, wenn das Sendesignal eine genügende Anzahl von Flankenwechsel beinhaltet. So würde zum Beispiel bei der OOK-Modulation in einem Datenstrom mit sehr vielen Nullen lange Zeit gar kein Trägersignal gesendet. Im Empfänger wäre es schwierig zu unterscheiden, ob es sich um eine große Anzahl von Nullen handelt oder ob der Sender vielleicht schon abgeschaltet ist. Häufig verwendete Verfahren zur Datenkodierung sind das Manchester Verfahren (auch Twinned binary Coding, Split Phase, Manchester Coding), das High Density Bipolar of Order 3 Verfahren (HDB3) und das Return to Zero Verfahren (RZ). Das Manchester Verfahren wandelt die Informationseinheit Bit in zwei unterschiedliche Signale um. Dazu wird während der ersten Hälfte einer Bitübertragung der Originalzustand des Bits und während der zweiten Hälfte des Bits der komplementäre Zustand übertragen. Ein Bit wird also in zwei unterschiedlichen Zuständen abgebildet, wobei der Signalpegel der kodierten Daten konstant ist. Während eines Datenstroms werden die gleiche Anzahl von Einsen und Nullen gesendet. Damit lässt sich die Taktrate leicht herausfiltern und damit der Empfänger synchronisieren. Beim HDB3 Verfahren wird eine binäre Folge in eine Folge dreier Werte derart umkodiert, dass Einsen abwechseln auf +1 und -1 abgebildet werden. Nullen werden jedenfalls auf den Wert 0 abgebildet. Zur leichteren Synchronisation werden höchstens drei aufeinander folgende Nullen zugelassen. Bei Auftreten von vier Nullen werden Bitersatzmuster verwendet und so in Summe ein gleichstromloser Spannungsverlauf gewonnen. Beim RZ Verfahren ist ähnlich dem Manchester Verfahren, jedoch wird hier nur die Eins in ein Signal mit zwei Hälften geteilt. Die erste Hälfte des Signals entspricht dem Originalsignal, die zweite Hälfte des Bits dem komplementären Zustand. Damit ist sichergestellt, dass es zumindest bei Einsfolgen zu genügend vielen Zustandswechsel kommt.

Ein kodiertes und durch Modulation in den hochfrequenten Spektralbereich des Trägersignals verschobenes Datensignal wird nun über eine Antenne abgestrahlt. Dabei wird ein elektromagnetisches Feld erzeugt, das sich mit Lichtgeschwindigkeit  $c_0$  in den Freiraum ausbreitet. Zwischen der Frequenz  $f$ , der Lichtgeschwindigkeit und der Wellenlänge  $\lambda$  der sich ausbreitenden Welle besteht dabei der grundlegende Zusammenhang:

$$c_0 = \lambda \cdot f = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \quad [\text{WEI98}] \qquad \textit{Formel 2-2}$$

Die von der Antenne abgestrahlten Funkwellen breiten sich im Allgemeinen geradlinig in Form einer ebenen Welle aus. Die Reichweite des elektromagnetischen Feldes ist dabei von mehreren Faktoren abhängig:

- der Wellenlänge  $\lambda$  bzw. der Frequenz  $f$

- den Luft- und Bodenverhältnissen (Reflektionen, Funkschatten)
- der abgestrahlten Sendeleistung
- der Empfindlichkeit des Empfängers
- den Eigenschaften von Sende- und Empfangsantenne

Diese Zusammenhänge werden in der nachfolgenden Gleichung zusammengefasst, die zur Ermittlung der Reichweite herangezogen werden kann:

$$P_E = P_S \cdot G_S \cdot G_E \cdot \left( \frac{1}{4 \cdot \rho \cdot r} \right)^2 \quad [\text{WEI98}] \quad \text{Formel 2-3}$$

Dabei bedeuten:

$P_E$  minimale Eingangsleistung des Empfängers die zum einwandfreien Empfang ausreicht

$P_S$  Sendeleistung

$G_S$  der Antennengewinn am Sender

$G_E$  der Antennengewinn am Empfänger

$r$  die Entfernung zwischen dem Sender und Empfänger

Der jeweilige Antennengewinn ist das Verhältnis der effektiv abgestrahlten Leistung der jeweiligen Antenne zu einem idealen Kugelstrahler. Eine Analyse von **Formel 2-3** lässt folgende Einflussfaktoren auf die Reichweite einer Funkübertragung erkennen:

- Typ und Gestalt von Sende- und Empfangsantenne werden in Form des Antennengewinns direkt berücksichtigt. Aus diesem Grund ist den Antennen ein eigenes Kapitel gewidmet.
- Hohe Trägerfrequenz und damit geringe Wellenlänge führt zu einer schlechteren Reichweite.
- Eine Erhöhung der Sendeleistung um das Vierfache ergibt die doppelte Reichweite.
- Einflüsse von Störungen und Hindernisse sind nicht berücksichtigt, verringern aber auf jeden Fall die Reichweite.

### 2.2.2 Antennen

Grundlage nahezu jeder Antenne ist der  $\lambda/2$ -Dipol, ein lang gestreckter Leiter mit der Einspeisung in der Mitte, die von einem Wechselstromgenerator angeregt wird. An ihm möchte ich den Abstrahlungsvorgang einer elektromagnetischen Welle kurz beschreiben [SIE98].

Der Generator regt einen Strom an, der die Dipolenden ähnlich zweier Kondensatorplatten auflädt. Im Moment der größten Ladungsmenge besteht die größte Potentialdifferenz zwischen den Enden. Das elektrische Feld am Dipol hat sein Maximum erreicht.

Der Aufladevorgang ist abgeschlossen und es fließt kein weiterer Strom mehr, damit hat sich zu diesem Zeitpunkt auf das magnetische Feld am Dipol vollständig abgebaut. Anschließend kehrt der Generator seine Polarität um, die Ladungsträger strömen nun zum gegenüberliegenden Dipolende. Erreicht der Strom und damit das magnetische Feld seinen maximalen Wert, ist für einen Moment der Dipol elektrisch neutral, positive und negative Ladungen kompensieren sich gerade. Die Potentialdifferenz zwischen den Dipolenden ist Null. Schließlich laden sich die Dipolenden wieder auf, diesmal jedoch mit entgegengesetzter Polarität.

Im Rhythmus der Generatorfrequenz bauen sich also elektrisches und magnetisches Feld am Dipol wechselweise auf und ab. Verfolgt man den Verlauf der elektrischen Feldlinien, die ihre Endpunkte auf den Elementarladungen haben, erkennt man eine Einschnürung zu dem Zeitpunkt, an dem der Strom seinen höchsten Wert erreicht. In diesem Moment findet die Polaritätsumkehr auf dem Dipol statt. Es baut sich ein Feld mit entgegengesetzter Richtung auf. Das Feld der ersten Halbwelle löst sich vom Leiter und breitet sich mit Lichtgeschwindigkeit im Raum aus. Das magnetische Feld verhält sich gleichartig, nur findet hier die Ablösung zum Zeitpunkt des Stromminimums statt, also eine Viertelperiode nach dem Spannungsminimum.

Der Phasenunterschied zwischen den Maxima von Strom und Spannung entspricht  $90^\circ$  bzw.  $\rho/2$ .

Bei dem abgestrahlten Feld unterscheidet man zwischen dem Nahfeld und dem Fernfeld. Das Nahfeld dominiert in der unmittelbaren Umgebung der Antenne. Mit zunehmendem Abstand bildet sich das Fernfeld und damit eine homogene, lineare Wellenfront, bestehend aus senkrecht zueinander stehenden elektrischen und magnetischen Feldkomponenten.

Zur optimalen Abstrahlung einer elektromagnetischen Welle muss eine Antenne also eine gewisse Länge haben. Im Falle des  $\lambda/2$ -Dipols also die halbe Wellenlänge. Bei einer Sendefrequenz von 433 MHz beträgt diese 34.6 cm, die bei Realisierung eines Projektes in Betracht gezogen werden müssen.

Wichtige Kenngrößen einer Antenne sind [SUC95]:

- **Polarisation**  
Waagrechte oder senkrechte Montage einer Antenne. Sende- und Empfangsantenne müssen in der gleichen Richtung montiert sein.
- **Richtcharakteristik**  
Abstrahlung der Antenne gleichmäßig in alle Richtungen, oder gibt es eine bevorzugte Sende- bzw. Empfangsrichtung.
- **Antennengewinn**  
Eine Antenne mit Vorzugsrichtung erbringt für diese Richtung auch einen Gewinn. Dieser Gewinn wird meist auf den idealen Kugelstrahler bezogen.
- **Impedanz**  
Jede Antenne besitzt eine Impedanz. Sende- und Empfangsstufen von Systemen müssen auf die jeweilige Antennenimpedanz angepasst werden um eine optimale Wirkung zu gewährleisten.

Neben dem  $\lambda/2$ -Dipol gibt es noch eine Fülle verschiedenster Antennentypen, von denen ich im Anschluss die wichtigsten nennen möchte:

Der **Faltdipol** lässt sich als kurzgeschlossener  $\lambda/2$ -Dipol vorstellen, wobei der Abstand des Kurzschlussbügels etwa  $1/20$  der Wellenlänge vom ursprünglichen Dipol betragen sollte. Er besitzt den vierfachen Wellenwiderstand im Vergleich zum normalen Dipol und bringt einen größeren Antennengewinn und eine größere nutzbare Bandbreite.

Wird eine Hälfte eines  $\lambda/2$ -Dipol senkrecht auf einer leitenden Fläche montiert, erhält man einen  **$\lambda/4$ -Monopol** (auch Marconi Strahler oder unsymmetrischer Monopol). Die Montage auf einer leitenden Fläche wirkt wie eine Spiegelung von einem Viertel der Wellenlänge und man erhält damit wieder ein  $\lambda/2$ -Strahler. Der große Vorteil liegt in der Verringerung der mechanischen Baugröße. Weiters besitzt der Monopol den halben Wellenwiderstand und einen Antennengewinn von 3 dB gegenüber dem  $\lambda/2$ -Dipol. Bei vertikaler Montage erzielt man damit eine Rundstrahlcharakteristik in horizontaler Ebene. Bekannt ist diese Antennenart durch ihren häufigen Einsatz beim KFZ.

Ausgesprochene Richtantennen sind z. B. die YAGI Antenne und die Parabolantenne. Die **YAGI** besitzt neben dem speisenden Dipol noch zumindest einen Reflektor (um etwa 10 % länger als der Dipol) und Direktorelemente (um etwa 10 % kürzer als der Dipol). Man erzielt dadurch eine ausgesprochene Richtwirkung und je nach Anzahl der verwendeten Direktorelemente hohe Antennengewinne. Die Parabolantenne wirkt als Parabolspiegel für einfallende Funksignale. Im Brennpunkt wird das Signal gebündelt, hohe Antennengewinne und Richtwirkung werden auch hier erreicht. Hauptsächlich wird diese Type beim Satellitenempfang eingesetzt.

**Microstrip-** oder **Patchantennen**, die bei Frequenzen ab 1 GHz eingesetzt werden, ermöglichen den Einsatz einer Schaltungstechnik, die billig, reproduzierbar, einen hohen Integrationsgrad, geringes Gewicht und eine niedrige Bauhöhe bietet. Die Grundform besteht aus einer durch Ätzung oder Siebdruck hergestellten Leiterbahn, die auf einem dielektrischen Träger, dem Substrat, aufgebracht ist. Die Unterseite des Substrates besteht aus einer leitenden, durchgehenden Masseschicht. Mittels dieser einfachen Anordnung ist es möglich, durch Leiterbahnen bestimmter Länge und Breite Induktivitäten, Kapazitäten und Transformationsleitungen zu realisieren. Zum Einsatz als Antenne wird hier der Effekt genutzt, dass jede Störung in einer ansonsten homogenen Leiterbahnstruktur, z. B. ein Sprung der Bahnbreite oder die Kante der Leitung, das Abstrahlverhalten fördert. Die verbreitetste Ausführung einer planaren Antenne (Patch) besteht aus einer rechteckigen, am Ende offenen Leiterbahn. Sie wird als  $\lambda/2$ -Resonator betrieben, d.h. ihre Länge entspricht der halben Wellenlänge der Resonanzfrequenz, Streufelder, die sich an ihren Stirnseiten zwischen Patch und Grundfläche ausbilden, addieren sich im Fernfeld zu einem linearen Feldstärkefeld. Die Ausbreitungsrichtung der Welle liegt senkrecht zur Antennenfläche. Der Antennengewinn ist stark von dem verwendeten Trägermaterial abhängig und lässt sich bei Verwendung eines verlustfreien Materials bis auf 9.5 dB in Bezug auf den idealen Kugelstrahler erzielen.

### 2.2.3 Das ISM Band

Die Abkürzung ISM steht für Industrial, Scientific and Medical und war ursprünglich für Hochfrequenzgeräte in diesen Bereichen vorgesehen. Das Comitee on European Postal Regulations (CEPT) regelt in Europa welche Frequenzen lizenzfrei verwendet werden können. Beschrieben sind diese in den Empfehlungen CEPT/ERC/70-03. Dabei beziehen sich die Bestimmungen auf erlaubte Frequenzbereiche, maximale Ausgangsleistung, Kanalabstand, Häufigkeit und Dauer von Übertragungen und empfohlener Anwendungsbereich. Die Empfehlungen der CEPT wurden in den meisten europäischen Ländern übernommen, es gibt aber national divergierende Restriktionen bzgl. Sendeleistung und

Bandbreite. Durch Harmonisierungsaktivitäten auf nationaler und internationaler Ebene versucht man, diese Unterschiede auszugleichen [KRE02].

Die Lage der ISM-Bänder ist weltweit nicht einheitlich geregelt, lediglich das 2.4 GHz Band ist universell, da in diesem Bereich Mikrowellenherde arbeiten.

Das ISM-Band umfasst mehrere Frequenzbereiche, wobei nur die höherfrequenten Bereiche bei 433 MHz, 860 MHz, 2.4 GHz und 5.7 GHz für die Datenübertragung geeignet sind, während die niederfrequenten Bereiche für Türöffnungssysteme, Alarmanlagen, Audiosysteme und zur Messwertübertragung verwendet werden.

Durch die dabei unvermeidbaren Aussendungen von Störstrahlungen können die ISM-Frequenzen für Funkanwendungen in der Nähe von Hochfrequenzgeräten gestört werden. Es sollte kein Problem darstellen beispielsweise ein Wireless LAN-Gerät auch in der näheren Umgebung eines Mikrowellenherdes zu platzieren, doch bei einer hohen Dichte von WLAN-, bzw. Bluetooth-Geräten, z. B. bei Kongressen, kann es schon zu bemerkbaren Störungen der Datenübertragung kommen. Prinzipiell ist eine Anwendung von ISM-Frequenzen möglich, wenn es nicht so sehr auf eine störungsfreie Funkverbindung ankommt, oder Störungen nur vorübergehend auftreten und hingenommen werden können sowie nur kurze Entfernungen zu überbrücken sind.

Die Möglichkeit Geräte zu beziehen, die ohne gesonderte Anmeldung und gebührenfrei von jedermann frei genutzt werden können ermöglichte z. B. den rasanten Siegeszug des Wireless LAN der letzten Jahre.

#### **2.2.4 WLAN**

Wireless LAN (Wireless Local Area Network, WLAN) steht für drahtloses lokales Netzwerk, wobei meist der Standard IEEE 802.11 gemeint ist [WLAN]. WLAN stellt eine Erweiterung für bis dato größtenteils verkabelte lokale Netzwerke dar und ermöglicht damit einen flexiblen, mobilen Zugriff auf bestehende Netzwerke. Meist im Einsatz von Laptops ist WLAN jedoch auch für eine kostengünstige Funkvernetzung von Personal Computer ohne umständliche und teure Kabelverlegearbeiten die Alternative. Im Zusammenhang mit WLAN wird oft das Kürzel Wi-Fi genannt, es steht für Wireless-Fidelity. Bedeutung hat das so genannte Wi-Fi Siegel, das Geräte kennzeichnet, die einen Interoperabilitätstest bestanden haben, also mit Geräten verschiedener Hersteller erfolgreich getestet wurden und standardkonform arbeiten.

Der erste WLAN Standard wurde als IEEE 802.11 im Jahr 1997 verabschiedet und kennzeichnet Geräte mit Datenraten bis 2 MBit/s. Zur Störungsbekämpfung werden die Verfahren FHSS und DSSS verwendet, betrieben werden die Geräte im lizenzfreien 2.4 GHz ISM Band auf 13 Kanälen in Europa, bzw. 11 Kanälen in den USA. Die maximal erlaubte Sendeleistung beträgt 20 dbm. Der Standard IEEE 802.11b erlaubt Datenraten bis 11 MBit/s, verwendet DSSS und arbeitet ebenfalls im 2.4 GHz Bereich. Die Standards IEEE 802.11g und IEEE 802.11n erhöhen die möglichen Datenraten auf bis zu 54 MBit/s. IEEE 802.11g arbeitet dabei im 2.4 GHz Band, ist abwärtskompatibel zu IEEE 802.11b, wohingegen IEEE 802.11n im 5 GHz Bereich angesiedelt ist. Beide verwenden zur Störungsunterdrückung DSSS, wobei bei IEEE 802.11n eine maximale Sendeleistung von 1 Watt erlaubt ist.

Netze mit WLAN arbeiten meistens im Infrastruktur-Modus, bei der eine oder mehrere Basisstationen (Access Points) die Kommunikation zwischen den Clients organisieren. Der Datentransport dabei läuft immer über die Basisstationen. Eine weitere Möglichkeit

besteht darin die Netze im Ad-Hoc-Modus zu betreiben, bei dem die Clients direkt miteinander kommunizieren können.

Teil des WLAN-Standards IEEE 802.11 ist Wired Equivalent Privacy (WEP), ein Sicherheitsstandard, der FHSS, DSSS und den so genannten RC4-Algorithmus enthält. Die enthaltene Verschlüsselung mit einer Länge von nur 40 Bit reicht jedoch längst nicht mehr zur Datensicherheit aus. Aus diesem Gründen wurden technische Ergänzungen entwickelt, etwa WEPplus mit 128 Bit-Verschlüsselung, Fast Packet Keying, Extensible Authentication Protocol, Kerberos oder High Security Solution, die alle mehr oder weniger gut das Sicherheitsproblem von WLAN verkleinern. Auch der Einsatz von Zugangsschutzsystemen (Firewalls) ist gerade bei WLAN unabdingbar. Der Nachfolger des WEP ist der WPA-Standard (Wi-Fi Protected Access). Er bietet eine erhöhte Sicherheit und gilt derzeit als nicht zu entschlüsseln, solange man bei der Einrichtung keine trivialen Passwörter verwendet. Die Weiterentwicklung WPA2 und der neue Sicherheitsstandard 802.11i sollen die Missbrauchsmöglichkeiten weiter erschweren.

Beim so genannten WarWalking werden mit einem WLAN-fähigen Notebook oder PDA offene, also nicht gesicherte WLAN-Netze gesucht. Diese werden dann mit Kreide markiert (WarChalking). Das Ziel ist hierbei entweder Sicherheitslücken aufzudecken und diese dem Betreiber zu melden oder aber einen kostenlosen Internetzugang zu erhalten oder gar Daten auszuspähen bzw. diese zu manipulieren. Fährt man bei der Suche eines offenen WLAN-Netzes mit einem Auto, so spricht man von WarDriving.

Dadurch, dass das 2.4 GHz-Band in den meisten Ländern lizenzfrei genutzt werden kann, haben Produkte nach dem Standard 802.11b eine weite Verbreitung gefunden. Dieser Standard wird bei der Firma Apple unter dem Namen AirPort geführt. Als möglicher Nachfolger von WLAN ist IEEE 802.16 alias Wimax in Planung.

### **2.2.5 Bluetooth**

Bluetooth ist ein Industriestandard für die drahtlose Vernetzung von Geräten mit geringer Reichweite. Bluetooth bietet eine drahtlose Schnittstelle, über die sowohl mobile Kleingeräte wie Mobiltelefone und Personal Digital Assistants (PDAs, ein Handcomputer) als auch Computer und Peripheriegeräte miteinander kommunizieren können. Ein solches Netzwerk wird auch als Wireless Personal Area Network (WPAN) bezeichnet [Bluetooth] [WPAN].

Die Entwicklung von Bluetooth begann bei Ericsson 1994, als man nach einer Möglichkeit suchte, die Kabel zwischen Mobiltelefonen und Zusatzgeräten zu ersetzen. Zusammen mit anderen Industriepartnern gründete man 1998 die Bluetooth Special Interest Group (SIG), um Bluetooth als Standard zu etablieren. Um dies zu erreichen, setzte man sich das Ziel, einen Transceiver (kombinierter Sender und Empfänger) mit geringen Herstellungskosten, flexiblen Einsatzmöglichkeiten, niedrigem Energieverbrauch, Robustheit gegenüber Störungen und der Fähigkeit Daten für multimediale Anwendungen übertragen zu können, zu spezifizieren. Der Bluetooth-Standard ist inzwischen von der Arbeitsgruppe der IEEE für WPANs adaptiert worden (IEEE 802.15) [WPAN].

Der Name Bluetooth stammt vom dänischen König Harald Blåtand (der Nachname bedeutet soviel wie Blauzahn), dem es im Mittelalter als erstem gelang, große Bereiche Skandinaviens (Teile von Dänemark, Schweden und Norwegen) unter seiner Herrschaft zu vereinen. So wie Harald Blåtand die Skandinavier einte, soll Bluetooth die Landschaft der Kommunikation elektrischer Kleingeräte einte.

Die Basis eines Bluetooth-Systems ist ein Mikrochip, das Bluetooth-Modul. Es benötigt wenig Energie, bietet integrierte Sicherheitsmechanismen und ist günstig herzustellen. Somit kann es in einer breiten Palette von elektronischen Geräten eingesetzt werden. Prinzipiell besteht ein Bluetooth-Modul aus einem Hochfrequenz-Teil und einem Basisband-Controller, der die Schnittstelle zum Hostsystem, z. B. dem PC, Laptop oder Handy darstellt. In der Norm sind drei Sendeleistungsklassen mit 10 mW (0 dBm), 2.4 mW (4 dBm) und 100 mW (20 dBm) definiert, die Reichweiten von etwa 10 m bis 100m zulassen. Die Stromaufnahme ist gering und liegt im Standby-Betrieb bei 0.3 mA und erreicht maximal Werte von 300 mA. Die Empfangsteile besitzen eine Empfindlichkeit von bis zu -70 dBm.

Bluetooth-Geräte senden im lizenzfreien ISM-Band zwischen 2.402 GHz und 2.480 GHz. Zur Störungsunterdrückung wird FHSS eingesetzt, bei dem das Frequenzband in 79 Frequenzstufen im 1 MHz-Abstand eingeteilt wird, die 1600 Mal in der Sekunde gewechselt werden. Theoretisch kann eine Datenübertragungsrate von 732.2 kBit/s erreicht werden. Mit der Version 1.2 (Enhanced Data Rate, EDR) können Daten etwa dreimal so schnell übertragen werden also mit rund 2.2 MBit/s. Bis zu sieben Verbindungen können dabei von einem Gerät aufrechterhalten werden, wobei sich diese Geräte die verfügbare Bandbreite teilen müssen. Bluetooth unterstützt die Übertragung von Sprache und Daten. Eine Verschlüsselung der transportierten Daten ist ebenfalls möglich.

Ein Bluetooth-Netzwerk (Piconet) kann bis zu 260 Teilnehmer umfassen, davon können jedoch nur sieben Geräte gleichzeitig aktiv sein können. Es besteht aus einem Master und bis zu sieben weiteren Teilnehmern (Slave). Der Master steuert die Kommunikation und vergibt Sendezeitscheiben (Sendeslots) an die Slaves. Ein Bluetooth-Gerät kann in zwei Piconetzen angemeldet sein, allerdings nur in einem Netz als Master. Bis zu zehn Piconetze bilden ein Scatternet (von „to scatter“ = ausstreuen), wobei die Teilnehmer untereinander in Kontakt treten können. Hierbei wird jedes Piconet durch eine unterschiedliche Frequency-Hopping-Folge identifiziert.

Wenn keine Daten zu übertragen sind, kann der Master in einem Piconet seine Slave-Einheiten in einen Modus zur Stromersparnis versetzen. Weitere Low-Power-Zustände, die vor allem für Portable-Anwendungen wie Mobiltelefone geeignet sind, sind der SNIFF- und PARK-Modus. Im SNIFF-Modus (von „to sniff“ = schnüffeln) arbeitet ein Slave in einem reduzierten Zyklus, während im PARK-Modus ein Gerät weiterhin synchronisiert bleibt, aber nicht am Datenverkehr teilnimmt.

### **2.2.6 ZigBee**

ZigBee und sein zugrunde liegender Standard IEEE 802.15.4 beschreiben offene Funknetz-Standards für zuverlässige, kostengünstige und verlustleistungsarme Sensor- und Aktor-Netzwerke, die sich gegenwärtig in der Markteinführung befinden. Die Anwendungspalette reicht von der Industrie und Automatisierungstechnik (z. B. Anlagensteuerung per Funk) sowie Spedition und Logistik (Güterüberwachung) über die Heim- und Gebäudeautomatisierung (kabelfreie Steuerung von Geräten und Anlagen), die Medizintechnik (drahtlose Patientendaten-Übertragung) bis hin zur Bedienung von Computer-Peripherie und Unterhaltungselektronik [ZigBee].

Die Aktivitäten rund um ZigBee begannen Ende 1998, als sich im Zusammenhang mit der Spezifikation des Home Radio Frequency-Standards (HomeRF) eine Arbeitsgruppe um Philips Electronics bildete, die Entwürfe für eine günstige, störungsempfindliche Funklösung mit der Bezeichnung HomeRF-Lite erarbeitete. Im Oktober 1999 wurde eine

erste Entwurfsfassung erstellt, in deren Dokumenten sich als zentraler Begriff das Protocol for Universal Radio Links (PURL) findet. Die ZigBee-Alliance wurde allerdings erst Ende des Jahres 2002 formal als Kooperation von Industrieunternehmen gegründet [ZigBee]. Die Vorschläge aus dem PURL, die die Bitübertragungs- und die Sicherungsschicht betreffen, wurden im Jahre 2001 der neu gebildeten Arbeitsgruppe IEEE 802.15.4 unterbreitet. Der zugehörige IEEE-Standard 802.15.4 beschreibt die beiden untersten Schichten des OSI-Referenzmodells, die physikalische Schicht (PHY) und die Zugriffskontrolle (MAC). Aufgaben wie Vernetzung und Vermaschung sowie das zugehörige Routing sind aber eigentlich Aufgaben der Netzwerkschicht (Layer 3) und sollen im aufbauenden ZigBee-Standard definiert werden. Die ZigBee-Alliance hingegen verfolgt das Ziel, die oberen Protokollschichten bis hin zum eigentlichen Applikationsteil zu definieren. Der Name ZigBee leitet sich übrigens ab von dem Zickzack-Tanz der Biene, die auf diese Weise ihren Artgenossen den Weg zur nächsten Nahrungsquelle mitteilt. Mittlerweile sind die Arbeiten am 802.15.4 weitestgehend abgeschlossen. Von Atmel, Chipcon, Motorola und ZMD sind Muster bereits verfügbar; andere Hersteller werden in Kürze nachziehen. Die Definition der höheren Layer ist hingegen noch nicht so weit gediehen.

Der IEEE-802.15.4-Standard sieht mit Reduced Function Devices (RFD) und Full Function Devices (FFD) zwei Geräteklassen vor. Ein RFD kann dabei nur mit einem FFD kommunizieren, während dieser eine Fülle von RFDs verwaltet und auch Daten mit anderen FFDs austauschen kann. RFDs lassen sich daher sehr einfach und kostengünstig implementieren, insbesondere ist auch eine Software-Realisierung auf einem 8 Bit-Mikrocontroller möglich. Mit diesen beiden Geräteklassen können die grundlegenden Stern- und Peer-to-Peer-Topologien gebildet werden. Damit ermöglicht ZigBee den Aufbau von leistungsfähigen und flexibel vermaschten Netzwerken. Die Protokolle für diese Vermaschung sind nicht Bestandteil des Standards, allerdings werden mögliche Realisierungen vorgeschlagen. Im Ergebnis kann die ZigBee-Protokollimplementierung in Abhängigkeit vom Funktionsumfang des Gerätes (RFD oder FFD) in 4 bis 30 kByte Code untergebracht werden.

ZigBee-Netzwerke können bis zu 255 aktive Knoten pro Personal Area Network (PAN) - Koordinator umfassen, wobei mehrere PAN-Koordinatoren zur Errichtung von über 4.000 Teilnehmer starke ZigBee-Netzwerke verknüpft werden können.

Verwendet wird die 64 Bit lange Struktur der erweiterten IEEE-Adressen. Um aber nicht immer die 64 Bit langen Adressen zu übertragen, können in einem PAN auch kurze 16 Bit-Adressen verwendet werden, die der PAN-Koordinator beim Anmelden (Association) einer Station zuweist. Darüber hinaus wird jedes PAN über einen so genannten PAN Identifier mit einer Länge von 16Bit adressiert.

Der Kanalzugriff beim 802.15.4 basiert grundsätzlich auf dem CSMA/CA-Verfahren, wie es auch vom IEEE 802.11 bekannt ist. Dieser sieht vor, dass jede Station den Kanal während eines durch eine Zufallszeit festgelegten Zeitraums (Random Backoff) auf Aktivität anderer Stationen überprüft, bevor sie mit der Übertragung beginnt. Allerdings kann bei Funknetzwerken senderseitig nicht sichergestellt werden, dass das auf diese Weise versendete Paket auch ungestört vom Empfänger aufgenommen werden konnte. Die Versendung einer Empfangsbestätigung (Acknowledgement) durch den Empfänger auf der Sicherungsschicht stellt diese Sicherheit her, ist bei ZigBee jedoch optional. Ein Verzicht auf die Empfangsbestätigung erscheint beispielsweise beim Betrieb von Sensornetzwerken sinnvoll. Versendet ein Sensor in regelmäßigen Zeitabschnitten seine Messwerte, so interessiert in vielen Fällen nur der letzte Messwert.

Für zeitkritische Daten können Zeitschlitze, die so genannte Superframe-Struktur, reserviert werden. Die Zuteilung dieser Zeitschlitze wird vom PAN-Koordinator übernommen.

Jeder Knoten kennt eine aktive und eine passive Phase. Die passive Phase stellt einen wesentlichen Bestandteil des Energiesparkonzepts von 802.15.4 dar, da in dieser Zeit keine Datenübertragungen erfolgen und der Power-down-Modus aktiviert werden kann.

ZigBee-konforme Produkte nutzen freie Frequenzbänder, weltweit wären dies 2.4 GHz, in den USA zusätzlich noch 915 MHz und in Europa 868 MHz. Bei 2.4 GHz können mit zehn Kanälen bis zu 250 kBit/s, bei 915 MHz mit sechs Kanälen bis 40 kBit/s und bei 868 MHz mit einem Kanal bis zu 20 kBit/s Datenübertragungsrate erzielt werden. Die Reichweite soll abhängig von der jeweiligen Sendeleistung und der Umgebung zwischen 10 bis 75 Metern liegen.

ZigBee sieht drei Sicherheitsstufen vor: keine Sicherheitsvorkehrungen, den Einsatz von einfachen Firewall-Funktionen (Access Control Lists, ACL) sowie die symmetrische Verschlüsselung unter Nutzung des AES-Algorithmus mit einer Schlüssellänge von 128 Bit. Diese Mechanismen können über die darüber liegenden ZigBee-Protokolle verwaltet werden.

Die Realisierungen der Anwendungsschicht werden nicht unmittelbar im ZigBee-Standard beschrieben, sondern in den so genannten Profilen (Application Profiles) definiert, die für spezifische Anwendungen sowohl den Aufbau der Geräte als auch deren Verhalten und Interaktion beschreiben. Dabei ist geplant, diese Profile nach ihren Anwendungsgebieten zu gliedern. So werden gegenwärtig die Profile Gebäudeautomation (einschließlich der industriellen Beleuchtungs- sowie Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik), Haustechnik, Industriesteuerungen sowie Fernsteuerungen und Consumer-Elektronik in den ZigBee-Gremien erarbeitet. Während die Profile selbst nicht Bestandteile des ZigBee-Protokollstapels sind, definiert der Standard sowohl die Schnittstelle zu der Anwendungsschicht als auch ein übergreifendes Gerätemodell und einen grundlegenden Befehlssatz.

Für den Einsatz des ZigBee-Standards ist die Zeit aber noch nicht gekommen. Hier wird man mit großer Wahrscheinlichkeit mindestens bis zum Herbst 2004 warten müssen. Und auch dann wird man sich weiterhin die Frage stellen müssen, ob für die eigene Anwendung eine standardisierte Lösung auf den höheren ZigBee-Protokollebenen benötigt wird oder ob nicht bereits die unteren Ebenen des 802.15.4 schon reichen.

## 2.3 Photovoltaik

Der Name Photovoltaik setzt sich aus den Bestandteilen *Photo* = das griechische Wort für Licht und *Volta* = nach Alessandro<sup>7</sup> Volta, zusammen. Sie beschäftigt sich mit der Umwandlung von Strahlungsenergie, vornehmlich Sonnenenergie, in elektrische Energie, ohne dabei thermische, chemische oder mechanische Zwischenschritte zu benötigen. Die Photovoltaik ist für viele der Inbegriff einer umweltfreundlichen Energiegewinnung.

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit dem Prinzip der Gewinnung elektrischer Energie aus dem Sonnenlicht und erläutert die Unterschiede verschiedener Technologien zur Herstellung von Solarzellen. Die Kenndaten von Solarzellen werden erläutert und Möglichkeiten zur Energiespeicherung kurz umrissen.

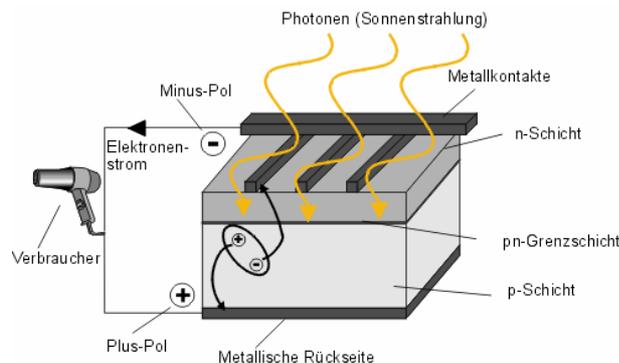
---

<sup>7</sup> Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Graf von Volta, 1745-1827; gilt zusammen mit Luigi Aloisi Galvani als der Begründer des Zeitalters der Elektrizität. Konstruierte 1800 die Voltasche Säule, die erste Batterie. Ihm zu Ehren wurde die Einheit der elektr. Spannung, das Volt, nach ihm benannt.

### 2.3.1 Prinzip der Solarzelle

Die Funktionsweise der Solarzelle zur Gewinnung elektrischer Energie aus der Lichtenergie beruht auf dem photovoltaischen Effekt<sup>8</sup> der seinerseits auf dem inneren photoelektrischen Effekt<sup>9</sup> basiert. Solarzellen sind Halbleiterbauelemente mit einem oberflächennahen pn-Übergang. An der Grenzfläche der unterschiedlich dotierten Halbleiter kommt es durch Diffusion von Elektronen vom n-seitigen (Elektronenüberschuss) zum p-seitigen (Elektronenmangel, Elektronenlöcher-überschuss) Bereich zur Ausbildung einer hochohmigen, elektrisch neutralen Raumladungszone. Bei Lichteinstrahlung des Grenzüberganges kommt es zur Absorption der Lichtquanten durch Elektronen, die energetisch vom Valenzband in das Leitungsband gehoben werden. Damit kommt es zur Ausbildung eines Elektronen-Loch-Paares, das durch das in der Raumladungszone herrschende elektrische Feld getrennt wird. Die negativ geladenen Elektronen wandern zum n-seitigen Bereich die positiv geladenen Elektronenlöcher zum p-seitigen Bereich des Halbleiters. An der Oberfläche der Solarzelle kommt zur Ausbildung einer Potentialdifferenz, der Photospannung, wobei der n-seitige Halbleiter als Minuspol, der p-seitige Halbleiter als Pluspol fungiert (Abbildung 2-4). Die Solarzelle stellt eigentlich eine großflächige Diode dar, die bei Lichteinfall als Spannungsquelle fungiert. Bei Ausbleiben der Beleuchtung, z. B. im Nachtbetrieb, muss diese Besonderheit berücksichtigt werden. Ein normalerweise nach geschalteter Energiespeicher würde ohne Schutzbeschaltung einen Stromfluss durch die unbeleuchtete Solarzelle verursachen [GOR96].

Die Absorption der Photonen erfolgt jedoch nur, wenn die Strahlungsenergie größer ist als die Energieniveaudifferenz zwischen Leitungs- und Valenzband des betreffenden Halbleiters. Für die Verwendung in Solarzellen eignen sich demzufolge nur Materialien, die u.a. eine entsprechende Energielücke aufweisen, wie z. B. Silizium (Si) mit 1.11 eV oder Galliumarsenid (GaAs) mit 1.40 eV [STA00].



**Abbildung 2-4: Prinzip einer Solarzelle**

Der in den Zellen erzeugte Strom ist proportional zu der Anzahl der einfallenden Photonen (der eingestrahelten Lichtmenge). Darum nimmt der Strom sowohl mit der Zellenfläche als auch mit der Lichtintensität zu. Die erzielte Spannung andererseits hängt

<sup>8</sup> Photovoltaischer Effekt (Photovoltaik.): entdeckt durch Alexandre-Edmond, franz. Physiker, im Jahr 1839: Bei Bestrahlung einer Silberelektrode in einem Elektrolyt tritt eine elektrische Spannung auf.

<sup>9</sup> Innerer photoelektrischer Effekt: Tritt bei Festkörpern auf, bei denen sich die Elektronen energetisch im nichtleitenden Valenzband befinden, und nur eine schwache elektrische Leitung möglich ist. Durch Photonen werden Elektronen in das energetisch höher gelegene Leitungsband gehoben, so dass das Material unter Beleuchtung seine elektrischen Eigenschaften ändert.

von dem Material der Zelle ab. Eine Siliziumzelle beispielsweise erzeugt eine Spannung von ca. 0.65 V unabhängig von ihrer Fläche. Durch Reflexion an Grenzflächen geht ein Teil der einfallenden Lichtstrahlung verloren, dies wird durch spezielle Antireflexbeschichtung deutlich vermindert. Man beschränkt sich dabei auf Entspiegelung im roten und infraroten Spektralbereich, da diese das Maximum des Spektrums des Sonnenlichtes darstellen. Solarzellen mit einer derartigen Entspiegelung erscheinen blau-violett, da dieses Spektrum weiterhin an der Oberfläche reflektiert wird. Eine andere Methode basiert auf pyramidenförmigen Oberflächenstrukturen, die sich speziell bei Silizium in bestimmten Ätzlösungen selbständig ergeben. Solarzellen mit einer solchen Oberfläche erscheinen schwarz, das eingedrungene Licht bleibt infolge von Totalreflexion in der Zelle gefangen. Die Dicke einer Solarzelle hängt in direkter Folge vom Absorptionskoeffizient des Halbleitermaterials ab. Bei Galliumarsenid genügen schon einige tausendstel Millimeter, bei kristallinem Silizium werden dazu einige zehntel Millimeter benötigt. Dieser Nachteil des Siliziums kann durch die pyramidenförmige Oberflächenstruktur abgemildert werden. Weiters wird durch eine Reflexionsschicht an der Rückseite der Zelle, z. B. durch einen metallischen Rückkontakt, der Weg der Photonen durch die Solarzelle verlängert und somit die Chance zur Absorption vergrößert. Allerdings steigt mit der Weglänge der Elektronen durch die Solarzelle auch die Wahrscheinlichkeit für eine Rekombination mit einem Elektronenloch, womit eine dünne Solarzelle erstrebenswert ist. Mehr als die Hälfte der Photonenenergie bleibt durch die mangelnde Übereinstimmung zwischen Photonenenergie und Energielücke ungenutzt. In so genannten Stapelanordnungen werden Solarzellen aus unterschiedlichen Materialien so hintereinander angeordnet, dass die Zelle mit dem größten Bandabstand zur Lichtquelle zeigt und die anderen Zellen mit kleiner werdendem Bandabstand dahinter liegen (zwei Ebenen - Tandemsolarzellen, drei Ebenen - Tripelsolarzellen) [FHBochum] [Photon]

### Technische Merkmale [STA00]

Die Kenngrößen einer Solarzelle werden für die so genannten Standard Test Conditions (STC) angegeben. Diese regeln die Einstrahlungsstärke, die Solarzellentemperatur, das Strahlungsspektrum und den Einstrahlungswinkel und sind in einer Norm festgelegt (DIN EN 61215, IEC 1215, DIN EN 60904, IEC 904), werden hier jedoch nicht weiter erläutert.

Die Kennwerte einer Solarzelle sind:

- Leerlaufspannung  $U_{OC}$   
Potentialdifferenz an den offenen Anschlussklemmen
- Kurzschlussstrom  $I_{SC}$   
Stromstärke der kurzgeschlossenen Solarzelle
- Spannung im bestmöglichen Betriebspunkt  $U_{MPP}$
- Strom im bestmöglichen Betriebspunkt  $I_{MPP}$
- Leistung im bestmöglichen Betriebspunkt:  
$$P_{MPP} = I_{MPP} * U_{MPP}$$

*Formel 2-4*

Der Betriebspunkt mit der maximalen abgegebenen Leistung
- Füllfaktor  $FF$   
Er ist ein Maß dafür, wie gut eine Solarzelle in der Lage ist, die durch Licht

erzeugten Ladungsträger zu sammeln und errechnet sich aus:

$$FF = \frac{I_{MPP} * U_{MPP}}{I_{SC} * U_{OC}} \quad \text{Formel 2-5}$$

- Koeffizient für die Leistungsänderung mit der Zelltemperatur
- Zellwirkungsgrad **h**  
Der Zellwirkungsgrad ist Verhältnis zwischen der abgegebenen elektrischen Leistung und der eingestrahlt Leistung und errechnet sich aus:

$$h = FF * I_{SC} * U_{OC} \quad \text{Formel 2-6}$$

Das charakteristische Verhalten einer Solarzelle wird dabei über die Strom-Spannungskennlinie (I-U-Kennlinie) gewonnen. Dabei wird der Solarzellenstrom über der angelegten Spannung aufgetragen und gibt damit Rückschluss auf die wichtigsten Solarzellenkenngrößen.

### Solarzellen aus kristallinem Silizium

Die meisten kommerziellen Solarzellen werden noch aus Silizium hergestellt. Silizium liegt auf der Erde als zweithäufigstes Element (27.5 %) in Form von Silikaten und Quarz vor. Durch die Reduktion von Quarz in Lichtbogenöfen erhält man metallurgisches Silizium mit einem Reinheitsgrad von 96 %. Die weitere Aufbereitung zu Halbleiterqualität erfolgt durch eine Reduktion mit Chlorwasserstoff und anschließender Destillation. Das so gewonnene Silizium ist das Ausgangsmaterial für zwei verschiedene Materialien für Solarzellen die beide zur Kategorie der Dickschichtsolarzellen zu zählen sind:

**Monokristallines Silizium** wird durch das Zonenschmelzverfahren des multikristallinen Rohsiliziums im Vakuum oder unter Schutzgas hergestellt. Eine zweite Möglichkeit stellt das Tiegelziehen dar, bei dem aus einer Siliziumschmelze in einem Quarz- oder Kohlenstofftiegel der Einkristall gezogen wird (Czochralski-Verfahren). Dabei sind die Kristalle bereits mit einer Grunddotierung mit Bor versehen (p-dotiert).

**Polykristallines Silizium** entsteht im Blockguss, wobei die gegossenen Blöcke kontrolliert abgekühlt werden um eine gerichtete Erstarrung mit typischer Kornstruktur zu erzielen.

Die Silizium-Einkristallstäbe werden durch Stahldrahtsägen unter Beimischung eines Öl-Siliziumcarbidgemisches in einzelne Rohscheiben, in die so genannten Wafer, geschnitten.

Die gesägten Wafer müssen noch mehrere chemische Bäder durchlaufen, damit die Sägeschäden behoben werden und sich eine pyramidenförmige Oberflächenstruktur zur Entspiegelung ausbildet. Zur Generierung eines pn-Überganges ist es notwendig der Oberfläche eine n-Dotierung zu versehen, was durch Prozessierung der Zelle in einem Ofen in einer Phosphor-Atmosphäre geschieht. Die Phosphoratome schaffen dabei eine Zone mit Elektronenüberschuss auf der Zelloberfläche die ca. 1 µm tief ist. Als nächster Schritt werden die Zellen mit einer Antireflexionsschicht versehen. Danach erfolgt die Bedruckung der Zelle mit den notwendigen Lötzonen und der Struktur zum Abgriff des generierten elektrischen Stroms. Die Vorderseite erhält meist zwei breitere Streifen, auf denen später die Bändchen zum Verbinden mehrerer Zellen befestigt werden. Außerdem wird ein sehr dünnes, elektrisch gut leitendes Raster aufgebracht, das einerseits den

Lichteinfall so wenig wie möglich behindern soll, andererseits die Ladungsträger so effektiv wie möglich einsammeln soll, um den ohmschen Widerstand so gering wie möglich zu halten. Die Rückseite wird meist vollflächig mit einem gut leitenden Material beschichtet. Nach der Prozessierung werden die Zellen nach optischen und elektrischen Merkmalen klassifiziert, sortiert und für die Modulproduktion ausgeliefert.

Der Vorteil von monokristallinen Siliziumzellen liegt im hohen erzielbaren Wirkungsgrad von etwa 20 % im Gegensatz zu bis etwa 16 % von polykristallinen Zellen, die ihrerseits ein besseres Preis-Leistungs-Verhältnis haben.

### **Amorphe Silizium-Solarzellen, Dünnschichttechnik**

Die Herstellung von amorphen Siliziumzellen (a-Si Zellen) erfolgt durch Aufdampfen eines Siliziumgases unter Hochfrequenz Glimmentladung auf einem Trägermaterial, wie z. B. Glas oder Stahlblech. Die Dotierung der einzelnen Schichten erfolgt dabei durch Zumischung entsprechender Gase während der Beschichtung. Als Vorderseitenkontakt finden vor allem transparente leitende Oxide wie Indium-Zinn-Oxid oder Zinnoxid Verwendung.

Amorphe Siliziumsolarzellen zählen zu der Kategorie der Dünnschichtsolarzellen, Schichtdicken von wenigen tausendstel Millimeter sind zur Lichtabsorption ausreichend. A-Si unterscheidet sich vom kristallinen Silizium in seinen physikalischen Eigenschaften ganz wesentlich, da kein Kristallgitter mit regelmäßiger Anordnung der Gitteratome existiert. Durch den Einbau von Wasserstoff werden Defekte im a-Si weitgehend abgesättigt und man erhält damit einen dotierbaren Halbleiter.

A-Si hat den Nachteil, dass es durch Lichtabsorption altert (Stabler-Wronski-Effekt). Dieser Effekt kann zwar durch entsprechend dünne Schichten gemildert werden, da jedoch für die Absorption eine gewisse Mindestschichtdicke erforderlich ist, ist man gezwungen auf Mehrschichtstrukturen überzugehen. Diese werden durch Materialien gleicher Bandstruktur oder durch Beimischung von Germanium auch als echte Tandemstrukturen realisiert.

Solarzellen aus a-Si sind wesentlich billiger als Solarzellen aus polykristallinem Silizium, haben jedoch einen geringeren Wirkungsgrad von bis knapp 8 % und den schon erwähnten Nachteil der Alterung durch Lichtabsorption.

Weitere interessante und günstige Dünnschichtmaterialien sind Cadmium-Tellurid (CdTe) mit einem Wirkungsgrad im Bereich von 9 bis 10 % und Kupfer-Indium-Diselenid (CuInSe<sub>2</sub> oder CIS), bzw. auch Kupfer-Indium/Gallium-Diselenid (CIGS) mit einem Wirkungsgrad von 10 bis 13 %.

### **Solarzellen aus Gallium-Arsenid**

Solarzellen aus Gallium-Arsenid werden in Dickschichttechnik hergestellt. Die dazu verwendeten Verfahren gleichen denen der Herstellung von Zellen aus kristallinem Silizium. Solarzellen aus Gallium-Arsenid sind sehr teuer, erreichen Wirkungsgrade von über 22 % und finden aufgrund ihrer Strahlenresistenz vor allem im Weltraum Verwendung.

### **Photovoltaikmodule**

Beispielsweise erreichen Solarzellen auf Basis von kristallinem Silizium eine Leerlaufspannung von etwa 0.65 Volt. Zur technischen Anwendung ist ein Verbund einzelner Solarzellen zu Photovoltaikmodulen demnach unumgänglich. Zur elektrischen

Verbindungen kommen dabei Schweiß- als auch Lötverfahren zum Einsatz, bei der Dünnschichttechnik ist die elektrische Serienschaltung meistens bereits Teil des Herstellungsprozesses. Neben der elektrischen Verschaltung sind die Hauptanforderungen an Module der Schutz vor mechanischen Belastungen und Umwelteinflüssen. Dazu finden zur Frontabdeckung Glas oder Kunststoffe eingesetzt. Eine rückseitige Abdeckung kann im Falle von Solarmodulen auf der Basis von Dünnschichtsolarzellen entfallen, sonst wird auch hier Glas oder Kunststoff eingesetzt.

### 2.3.2 Energiespeicherung

Zur Aufrechterhaltung der Energieversorgung des elektrischen Verbrauchers einerseits bei kurzzeitigen Spitzenlasten und andererseits zur Überbrückung von unvermeidbaren Dunkelphasen ist eine Energiespeicherung der gelieferten Energie von Solarmodulen unumgänglich. Grundsätzlich kann elektrische Energie direkt in Spulen oder Kondensatoren gespeichert werden, jedoch ist deren Speichervermögen gering [STA00].

Für kleinere Anwendungen bieten sich dennoch **Doppelschichtkondensatoren** (Goldcap, Ultra-Capacitor, Super-Capacitor) an. Die Energiespeicherung in der elektrochemischen Doppelschicht beruht auf der Tatsache, dass die Ladung der elektronisch leitenden Elektrode an der Grenzfläche Elektroden/Elektrolyt durch einen Überschuss der entsprechenden Gegenionen des Elektrolyten kompensiert wird. Die relativ hohe Kapazität beruht auf der geringen Dicke der Doppelschicht, die bei konzentrierten Elektrolyten mit hoher Ionendichte nur einige 100 nm beträgt. Der entscheidende Schritt zur weiteren Kapazitätssteigerung ist die Verwendung von Elektrodenmaterial mit großer Oberfläche (Kohle, Metalloxide wie  $\text{RuO}_2$ ). Als Elektrolyt werden vorwiegend organische Substanzen auf der Basis von quaternären Salzen wie Tetraäthylammoniumborofluorid und Acetonitril oder Propylenkarbonat als Lösungsmittel eingesetzt [DOPP02]. Diese Elektrolyte erlauben eine Zellspannung von typisch 2.5 Volt. Vorwiegend wird eine monopolare Anordnung mit langen gewickelten oder einer Vielzahl gestapelter Elektroden hergestellt. Dies erlaubt Elektrodenoberflächen, wie sie für große Kapazitäten erforderlich sind. Kapazitäten bis 60 Farad bei Anschlussspannungen von 2.5 Volt sind heutzutage möglich [Nuintek].

Als weitere Energiespeicher bieten sich **Akkumulatoren** an, die in breitem Maßstab am Markt verfügbar sind. Die Energiespeicherung geschieht hier im Gegensatz zum Kondensator mittels einer chemischen Reaktion die durch die von außen zugeführte elektrische Energie erzwungen wird. Beim Entladen wird die Energie per elektrochemischer Reaktion wieder zurück in elektrische Energie gewandelt. Als wichtigste Typen sind hier Blei-, Nickel-Cadmium-, Nickel-Metallhydrid- und Lithium-Ionen-Akkumulatoren zu nennen. Bei der Auswahl geeigneter Typen sind neben der unterschiedlichen Zellenspannung (Pb 2 Volt, NiCd und NiMH 1.2 Volt, Li-Ion 3 bzw. 4 Volt) und der Nennkapazität, der zulässige Temperaturbereich, die Selbstentladung und die Anfälligkeit auf den so genannten Memory-Effekt<sup>10</sup> zu beachten.

Jeder Energiespeicher bedarf einer gewissen Kontrolle von Ladung und Entladung, bei Nichtbeachtung kann sich die Lebensdauer eines Akkumulators mehr als halbieren. Dabei sind folgende Anforderungen zu bewältigen:

- Begrenzung der Lade- und Entladespannungen und -ströme
- Vermeidung von zu starker Entladung (Tiefentladung)

<sup>10</sup> Memory-Effekt: Dauerhafter Verlust der Leistungsfähigkeit eines Akkumulators bei nicht vollständiger Entladung vor einem neuerlichen Ladezyklus.

- Verhinderung falsch gerichteter Energieströme (z. B. nächtliche Entladung über Solar-module)
- Durchführung von Pflegemaßnahmen
- Bestimmung des Ladezustandes

Lade/Entladeregler in Form von integrierten Schaltungen sind für die gängigen Akkumulatortypen am Markt verfügbar, einige Typen lassen sich unkompliziert von einer Akkumulatortype auf eine andere umstellen.

Bei Kleinsystemen kann ggf. auf einen Laderegler verzichtet werden, wenn beispielsweise beim Einsatz von NiCd- oder NiMH-Akkumulatoren der vom Solarmodul gelieferte Strom kleiner als der zulässige Dauerladestrom ist, üblicherweise beträgt dieser ein Zehntel der Akkumulator-kapazität. In diesem Fall ist lediglich eine Entladeschutzdiode zwischen Solarmodul und Akkumulator erforderlich, die die bei Ausbleiben der Beleuchtung einen Rückstrom in das Modul verhindert.

# Kapitel 3

## Problemanalyse

Nach der Übernahme des Diplomarbeits-themas und der Erläuterung des zu realisierenden Netzwerkschemas durch meinen Betreuer, ging es nun daran detaillierte Angaben in Zusammenarbeit mit dem Auftraggeber, das so genannte Pflichtenheft zu erarbeiten. Dies gestaltete sich insofern schwierig, dass die Ansprechpartner lediglich telefonisch und per e-Mail erreichbar waren.

Im folgenden Kapitel werden die Details des bereits in der Einleitung skizzierten Gesamtschemas in ihren Schwerpunkten erläutert. Bereits in den ersten Gesprächen ließ sich eine grobe Unterteilung der Aufgabe in zwei Teilschritte erkennen.

Der erste Schritt sollte sich mit der Suche nach der passenden Hardware, einerseits für das Funknetzwerk und andererseits zur Realisierung der GSM-Schnittstelle zur Datenbank, befassen. Für die Anbindung an das Feldbussystem LonWorks, sowie die Verwendung eines bestimmten Temperatursensors bestand eine Vorgabe des Auftraggebers. Erst nach der Vorauswahl der Hardware konnten nun die Randaufgaben des Projektes mit dem Auftraggeber endgültig definiert werden.

Die Entwicklung der notwendigen Schaltungen und die funktionelle Kopplung der Einzelelemente schließlich sollten den abschließenden Teil der Arbeit bilden.

In den folgenden Abschnitten wird das Gesamtschema detailliert erläutert und die Gründe, die zu einer Aufteilung in zwei Einzelprojekte führten, dargelegt. Die Problematik rund um die Realisierung eines Funknetzwerkes mit den geforderten Eigenschaften, wird in weiteren Abschnitten beschrieben.

### 3.1 Kriterien zu einem low power Betrieb

Funksysteme die einen low power Betrieb ermöglichen, haben gewisse Voraussetzungen zu erfüllen. Ein problemloser Einsatz mit z. B. Batterien soll mit ihnen über Jahre hinweg möglich sein. Es ist klar, dass dies nicht bei einem dauerhaften aktiven Betrieb der Fall sein kann, es gilt also zu klären unter welchen Kriterien der Einsatz einer bestimmten Hardware möglich ist.

Zwei Eigenschaften gilt es zu erfüllen, erstens soll es einen so genannten power safe mode für das System geben, der zu einer möglichst geringen Stromaufnahme führt. Zweitens muss es möglich sein das System binnen kürzester Zeit wieder in den aktiven Zustand zu bringen, damit es seinen vorgesehenen Dienst erledigt um dann wieder zurück in den stromsparenden power safe mode zu gehen. Es gilt also zwei unterschiedliche Betriebsarten mit zwei unterschiedlichen Stromaufnahmen und entsprechenden Einschaltzeiten zu berücksichtigen.

In Abbildung 3-1 ist der soeben erwähnte Sachverhalt anschaulich dargestellt.

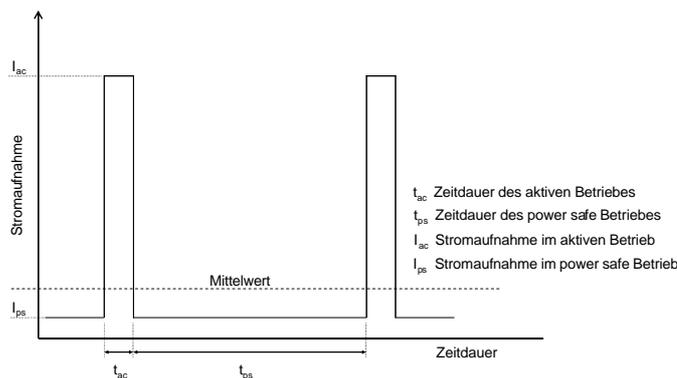


Abbildung 3-1: Betriebszustände für power safe Betrieb

Das Verhältnis zwischen der Zeitdauer des aktiven Betriebes  $t_{ac}$  und der Zeitdauer des power safe mode  $t_{ps}$  bezeichnet man auch als Tastverhältnis  $TV$  (Duty Cycle):

$$TV = \frac{t_{ac}}{t_{ps}} \quad \text{Formel 3-1}$$

Der mittlere Stromverbrauch  $I_m$  errechnet sich mit Hilfe des Tastverhältnisses, der Stromaufnahme im aktiven Betrieb  $I_{ac}$  sowie der Stromaufnahme im power safe Betrieb  $I_{ps}$  zu:

$$I_m = \frac{1}{TV + 1} \cdot (I_{ac} \cdot TV + I_{ps}) \quad [A] \quad \text{Formel 3-2}$$

Die zu erwartende Betriebsdauer  $T$  bei vorgegebener Batteriekapazität  $K$  ergibt sich schließlich zu:

$$T = \frac{K}{I_m \cdot 24} \quad [Tage] \quad \text{Formel 3-3}$$

Um den Einfluss der einzelnen Faktoren auf die Batterielebensdauer abschätzen zu können, dienen die folgenden Abbildungen. In Abbildung 3-2 ist die Batterielebensdauer bei festem  $I_{ps}$  von  $5 \mu A$  bei verschiedenen Tastverhältnissen dargestellt.

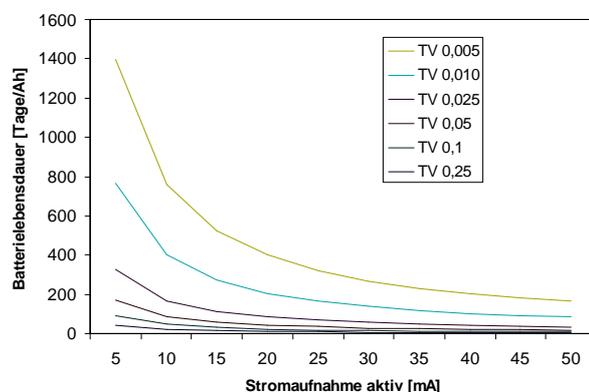


Abbildung 3-2: Batterielebensdauer bei festem  $I_{ps}$

In Abbildung 3-3 hingegen ist  $I_{ac}$  mit einer Größe von 30mA fixiert und  $I_{ps}$  wird variiert.

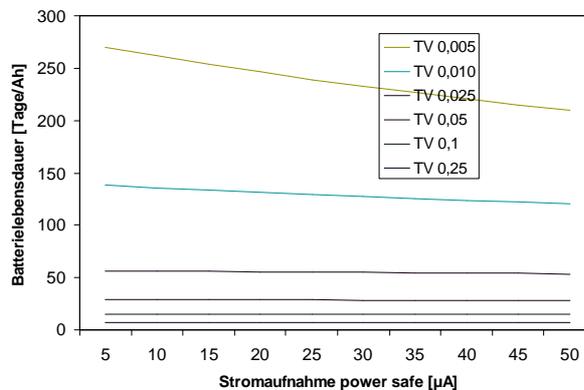


Abbildung 3-3: Batterielevensdauer bei festem  $I_{ac}$

Es lassen sich folgende Sachverhalte aus den Abbildungen ablesen:

Der zu erwartende Einfluss des Taktverhältnisses zu der Batterielevensdauer. Je größer dieses wird, je vergleichsweise länger also die aktive Phase des Systems dauert, desto kürzer wird die Batterielevensdauer. In Fall der Temperaturknoten ist ein Taktverhältnis von etwa 0.0067 zu erwarten (zwei Sekunden angenommene Aktivphase alle fünf Minuten).

Der große Einfluss der Stromaufnahme in der Aktivphase ist aus Abbildung 3-2 ersichtlich, wohingegen die Stromaufnahme der Ruhephase keinen solcherart ausgeprägten Einfluss erkennen lässt.

Den wesentlichsten Einfluss auf die Batterielevensdauer ist in unserem Fall, bei einem durch die Aufgabenstellung fix vorgegeben Taktverhältnis die Stromaufnahme in der Aktivphase, während die Stromaufnahme der Ruhephase bei gängigen verfügbaren Halbleitern in der Größenordnung weniger  $\mu A$  liegt.

## 3.2 Gesamtschema - Teilung des Projektes

Die erste Tätigkeit bestand in der Suche nach passender Hardware, die zur Realisierung der geforderten Aufgaben geeignet scheint. Zur Anbindung an das LonWorks Netzwerk wurden vom Auftraggeber bereits die Type Neuron 3120 bzw. Neuron 3150 der Firma Echelon [Echelon] vorgegeben. Die Hardware Architektur ist direkt auf das LonTalk-Protokoll zugeschnitten. Die Funktionseinheiten der Neuron Chips sind vor allem ein Kommunikationsport, eine I/O-Logikeinheit, zwei Timer/Counter sowie zusätzliche Steuerlogik. Die Firmware des Neuron enthält vor allem das LonTalk-Protokoll und eine I/O-Library zur Betrieb unterschiedlichster Funktionen der 11 I/O Leitungen, wie z. B. als Triggereingang, Aufbau verschiedenster serieller Kommunikationsstandards, parallele Ankopplung eines zweite Neuron Chips oder beliebiger Mikroprozessoren, als Dualslope Analog/Digital Wandler, Ansteuerung verschiedener Aktortypen mit zeit- und impulsbezogenen Ausgabewerten (z. B. als Pulsweitenmodulation, Phasenanschnittsteuerung mit Triac, Schrittmotorsteuerung). Die beiden Typen unterscheiden sich nur

durch den Aufbau ihrer Speicherstrukturen. Der 3120 stellt die Firmware in einem on-chip-ROM zur Verfügung und ist somit eine echte single-chip-Lösung, während der 3150 externen Speicher betreibt und damit auch größere Applikationen bearbeiten kann, dazu sind Adress- und Datenbus sowie die Steuerleitungen beim 3150 nach außen geführt.

Die Schnittstelle zum Netzwerk stellt der Communication Port dar, der über eine eigene Logikeinheit verfügt. Das LonTalk-Protokoll unterstützt auf Schicht 1 (Physical Layer) verschiedene Übertragungsmedien wie Twisted Pair, Powerline, Funk, Infrarot, Koaxkabel und Lichtwellenleiter. Zur Anbindung an die verschiedensten Medien kann im Fall Twisted-Pair der im Neuron Chip direkt eingebaute Transceiver verwendet werden, zur Ankopplung anderer Medien, insbesondere zur Datenübertragung über Funk, werden zusätzliche Komponenten benötigt.

Mit der Fähigkeit der Netzankopplung über Funk mittels der Neuron Chips, bot sich die Möglichkeit an, das geforderte Funknetzwerk mit diesen aufzubauen. Die Chips bieten auch einen Sleep Mode mit der minimalen Stromaufnahme von 15 µA. Bei der Recherche nach einem passenden Funktransceiver, stellte sich jedoch heraus, dass die am Markt erhältlichen bereits Komplettlösungen eines LonWorks-Knotens darstellen und ein Einsatz im Projekt nicht möglich ist.

Die weitere Suche galt Bauteilen der stark verbreiteten WLAN-Technologie, jedoch erwiesen sich diese als nicht brauchbar, da sie durchwegs einen zu hohen Stromverbrauch im Ruhebetrieb aufweisen. Als Beispiel sei lediglich eine Type der Hersteller Dallas Semiconductor Maxim in Tabelle 3-1 angeführt. Viele Hersteller, darunter auch Maxim, kündigen spezielle Varianten ihrer Halbleiter mit einem low-power shutdown-mode an, zum Zeitpunkt der Arbeit an dieser Diplomarbeit waren sie noch nicht verfügbar.

Type/Hersteller	Spannungsbereich/ Stromaufnahme/Sensitivität/Datenrate	max. Datenrate
MAX2820/MAX2820A 2.4 GHz Der Firma MAXIM www.maxim-ic.com	Spannung: 2.7 - 3.6 V Ruhe/Standby: 25 - 35 mA Aktiv: RX: 80 - 100 mA; -97 dBm bei 1 MBit/s TX: 70 - 85 mA; +2 dBm bei 11 MBit/s	11 MBit/s

**Tabelle 3-1: WLAN - Modul**

Die Datenwerte der nächsten Gruppe von Halbleitern, die in Frage kamen, den Bluetooth-Modulen, ließen mehr hoffen. Tabelle 3-2 zeigt die Daten eines typischen Vertreters, hier von der Firma Philips. Der gravierende Nachteil betrifft das Bluetooth-Protokoll in Bezug auf den Standby-Betrieb. Um eine Datenkommunikation mit dem Master nach einer Inaktivitätsphase wieder aufnehmen zu können, sind diverse Synchronisationsvorgänge mit diesem notwendig. Dieser Vorgang kann anhand des Bluetooth-Protokolles durchaus einige Sekunden dauern, was die aktive Phase und damit die Phase der höheren Stromaufnahme erheblich verlängert. Ein vernünftiger Betrieb mit Batterien wird wesentlich verkürzt und entspricht nicht der verlangten Aufgabenstellung. Weiters müssen die einzelnen Sensorknoten ihre Daten alle fünf, bzw. fünfzehn Minuten an die Basisstation melden. Bei jeweiliger Synchronisation von einigen Sekunden stellt dies

einen unnötigen Overhead an das System dar. Ebenfalls gegen einen Einsatz von Bluetooth-Modulen sprechen die relativ hohen Kosten.

Im Kapitel 2.2.6 wurde bereits ein Funkprotokoll speziell für die Gebäudeautomation, ZigBee, vorgestellt. Die Anforderungen dieses Projektes würden den Spezifikationen des Protokolls genau entsprechen, geringe Datenrate, low power Modi für den Batteriebetrieb und geringe Kosten. Wie schon dargelegt sind entsprechende Module erst in Vorbereitung und nicht wirklich verfügbar.

Bei den Recherchen stieß ich auch auf die Homepage der Firma EnOcean [EnOcean], die Funkmodule für die Gebäudeautomation anbietet, die ohne externer Energieversorgung auskommen. Funkschalter und Sensoren versorgen sich selbst aus verfügbarer Umgebungenergie, die überall in kleinen Mengen vorhanden ist. Schalter können zum Beispiel aus der mechanischen Energie der Betätigung mittels Piezokristallen versorgt werden, Temperatursensoren aus dem Temperaturgefälle zur Umgebung, Vibrationsensoren aus der Energie der Vibration und Positionssensoren aus der Bewegung, Beleuchtungssensoren aus der Lichtenergie und so weiter. Damit sich eine Elektronik und Funktechnik mit extrem geringem Leistungsbedarf. Lediglich der Empfänger, bzw. Aktuator wird an die übliche Energieversorgung angeschlossen. Das System arbeitet im Bereich von 869 MHz des ISM-Bandes, der Hersteller spricht von einer Reichweite der Module innerhalb von Gebäuden von 30m im Freien sogar von 300 m. Jeder Sender trägt eine eindeutige 32 Bit breite Adresse. Angeboten werden Module zur Übertragung von Schalterstellungen mit Piezobetrieb, ein Sensormodul mit einer Energieversorgung mittels Solarmodul, das Analog/Digital Wandlereingänge zur Messung von Temperatur, Druck, Beleuchtungsstärke usw. ermöglicht, sowie dazu passende Empfängermodule. Weiters wird ein bidirektionales Transceivermodul mit eingebauter serieller Schnittstelle und einem passenden Evaluierungskit zur Entwicklung eigener low power Anwendungen angeboten. Der einzige Haken dabei ist der Preis von mehr als 40 €pro Modul und daher als low cost Variante nicht zulässig.

Type/Hersteller	Spannungsbereich/ Stromaufnahme/Sensitivität/Datenrate	max. Datenrate
BGB101 2.4 GHz Der Firma Philips Semiconductor www.semiconductors.philips.com	Spannung: 2.6 - 3.4 V Ruhe/Standby: 10 - 30 µA Aktiv: RX: 40 - 48 mA; -82 dBm TX: 33 - 40 mA; +4 dBm	732.2 kBit/s

**Tabelle 3-2: Bluetooth - Modul**

Im Zuge eines Diplomandenseminars wurde ich auf eine vorangegangene Diplomarbeit mit dem Thema „Feldbusintegration von Ultra Low Power Funksensoren“ von Dipl.-Ing. Andreas Friedl aufmerksam. Dabei stand der damalige Diplomand einer ähnlichen Aufgabenstellung gegenüber. Seine Lösung bestand in Entwicklung eines proprietären Funkprotokolls, das ZigBee ähnlich aufgebaut ist. Friedl verwendete als Funktransceiver dabei den CC1010 der Firma Chipcon [Chipcon]. Dieser Chip ist ein single-chip low power RF-Transceiver mit einem 8051 kompatiblen Mikrocontroller. Der 8051 Mikro-

controller besitzt einen 32 kB frei programmierbaren Flashspeicher mit 2048 Byte SRAM. Weiters ist ein drei Kanal Analog/Digitalkonverter mit einer Auflösung von 10 Bit, eine Echtzeituhr, vier Timer, eine SPI-Schnittstelle, zwei UART Schnittstellen und 26 I/O Anschlüsse integriert, um nur die wichtigsten Features zu nennen. Der Transceiver ist im weiten Bereich von 300-1000 MHz verwendbar, wobei dieser in die Unterbereiche 315-433, 868 und 915 MHz des ISM-Bandes eingeteilt ist. Eine Verwendung des Chips im jeweiligen Bereich ist durch den Austausch weniger externer Bauteile, sowie dem Setzen von Parametern einfach möglich. Die maximale Datenrate der Funkübertragung beträgt 76.8 kBit/s, die Ausgangsleistung lässt sich dabei von -20 bis zu +10 dBm einstellen. Der Chip hat eine hohe Empfangseingangsempfindlichkeit von -107 dBm, bei einer Übertragungsrate von 2.4 kBit/s. Unter Abbildung 3-4 sind die Betriebsmodi des Chips aufgelistet, besonderes Augenmerk wird hierbei auf den power-down Modus mit 0.2 µA zu richten.

Offen war noch eine Möglichkeit zur GSM-Übertragung zu finden. Der erste Gedanke war, bezugnehmend auf die Fähigkeiten des schon vorgestellten Neuron-Chips, ein handelsübliches Mobiltelefon mit eingebauter serieller Schnittstelle zu verwenden. Dies könnte dann an den Neuron-Chip gekoppelt und von diesem quasi ferngesteuert werden. Lediglich eine SIM-Karte, die zum Betrieb des Telefons notwendig ist, wäre noch vonnöten.

Durch Internetrecherchen stieß ich dann jedoch auf GSM/GPRS Module der Firma Sony/Ericsson [SonyEric] mit bereits integriertem TCP/IP Protokollstapel, das einen effektiven Einsatz mittels GPRS zur Datenübertragung möglich macht. Weiters besitzen diese Systeme diverse I/O's, sowie einen Analog/Digital Wandler und erlauben eine Übertragung in den GSM Frequenzen 850 bzw. 1900 MHz. Ein Einsatz der GSM/GPRS Module wurde vom Auftraggeber gegenüber der Mobiltelefonvariante vorgezogen.

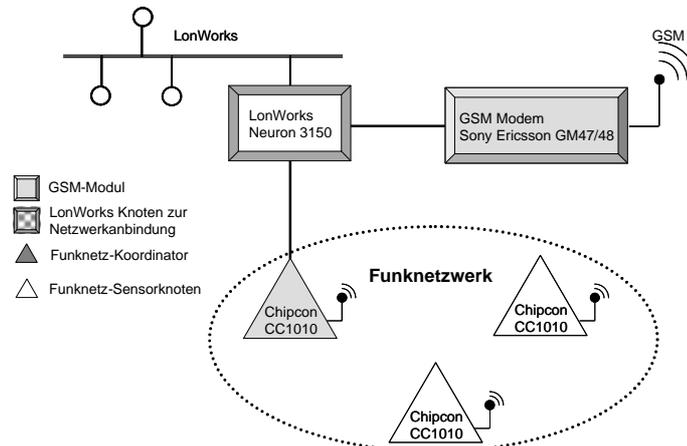
Mode	Core	Peripherals	Typical current consumption <sup>1</sup>	Exit condition
Active	Main osc.	Main osc.	14.8 mA at 14.7456 MHz	Writing SFR
	RTC osc. (32 kHz)	RTC osc. (32 kHz)	1.3 mA	Writing SFR
Idle	Stopped	Main osc.	12.8 mA at 14.7456 MHz	Interrupt Reset Power off/on
	Stopped	RTC osc. (32 kHz) ADC Off	29.4 uA	
Power-Down	Stopped	ADC On (32 kHz)	200 uA	ADC value exceeds threshold Reset Power off/on
	Stopped	Stopped	0.2 uA	Reset Power off/on

**Abbildung 3-4: Betriebsmodi, Auszug aus dem Datenblatt des CC1010 [CCDS03]**

Damit standen die Halbleiter fest, Abbildung 3-5 zeigt das Gesamtschema des Projektes mit den einzelnen Modulen.

Das Funknetzwerk mit den Sensorknoten und dem Netzkoordinator sollen also mit Chipcon CC1010 Halbleitern aufgebaut werden. Der Netzkoordinator wird mittels serieller Schnittstelle an einen LonWorks Neuron Chip der Type 3150 gekoppelt. Der Grund zur Auswahl des 3150 Typs lag darin, dass Sensordaten bis zu einer Übertragung per GSM über einen längeren Zeitraum, z. B. ein Tag, zwischengespeichert werden

müssen. Weiters bietet das GSM - Modul selber nur einen geringen Speicherplatz und erfordert eine Steuerung seiner Funktionen. Wie schon erwähnt, beinhaltet der 3150 Chip eine breite Palette von seriellen Schnittstellen und die Möglichkeit externen Speicher anzusprechen um so die Speicherkapazität wesentlich zu erhöhen. Damit bietet sich der Chip einerseits zur Aufnahme der Daten der Sensorknoten und zur Steuerung des GSM-Modules an.



**Abbildung 3-5: Gesamtschema**

Eine genauere Analyse der Diplomarbeit von Friedl führte zu dem Ergebnis, dass im realisierten Protokollstack umfangreiche Änderungen in Bezug auf Adressierung, Sensorik und Datensicherheit, sowohl beim Netzkoordinator als auch bei den Sensorknoten sowie auch eine Änderung der Hardware notwendig waren.

Aufgrund der Komplexität der Gesamtaufgabe wurde vom Betreuer dieser Diplomarbeit eine Aufteilung des Konzeptes beschlossen, wobei meine Aufgabe in der Realisierung des Funknetzwerkes mit der Anbindung an den Neuron Chip bestand, in Abbildung 3-5 punktiert umrahmt. Die Programmierung des Neuron Chips zur Aufnahme der Sensordaten und deren letztendliche Weiterleitung mittels GSM wurde an einen anderen Kollegen vergeben.

### 3.3 S0-Eingänge

Zu der Aufgabenstellung gehört auch die Messung von Verbrauchsdaten. Diese werden allerdings nicht direkt gemessen, sondern bereits vorhandene Mengen- oder Verbrauchszähler werden dazu eingesetzt. Diese Geräte besitzen einen Impulsausgang, den so genannten S0-Ausgang, der jeweils nach Konsumation der kleinsten Einheit des betreffenden Verbrauchsgutes einen Impuls liefert. Die Spezifikationen dieser S0-Ausgänge ist in der Norm nach DIN 43868 Ausgabe 1992-07 festgelegt. Diese legt Grenzströme und Grenzspannungen fest [S0].

Für Wechselstromzähler gelten folgende Vorschriften:

- Die maximale Anschlussspannung darf maximal 27 V betragen

- Bei einem Schleifenwiderstand von 800 Ohm muss noch ein Strom von 10 mA fließen können
- Eine Stromstärke kleiner als 2.5 mA gilt als Low-Zustand
- Eine Stromstärke größer als 10 mA gilt als High-Zustand

Für Gas- und Wasserzähler beträgt die Schwellenspannung 12 V bei dem Schwellenstrom von 10 mA für den High-Zustand.

Um eine Impulseingang zu kreieren, der für die beiden Zählertypen geeignet ist, muss also eine Spannungsversorgung mit einer Spannung von mindestens 12 V vorgesehen werden. Der damit über die S0-Impulszähleingänge getriebene Strom liefert an einen 1200 Ohm Widerstand einen für die Impulserkennung repräsentativen Spannungsabfall.

Es ist klar, dass der Spagat low power und Einsatz eines S0-Einganges aufgrund der notwendigen Spannungsversorgung nicht möglich ist.

### 3.4 Das Funknetzwerk

Die Aufgabe des Funknetzwerkes besteht in der drahtlosen Verbindung der Knoten zur Temperaturmessung und Impulszählung. Wie wir bereits gesehen haben, ist eine low power Variante eines Funksensors, nur im Fall der Temperaturmessung möglich. Eine Übertragung ist lediglich alle fünf Minuten notwendig, eine Erfüllung der Voraussetzungen aus Kapitel 3.1 scheint hier möglich.

Eine alternative Versorgung von Sensorknoten mit S0-Impulszähleingang mit Solarzellen gilt es zu prüfen. Der allgemeine Montageort für Verbrauchszähler zählt nicht gerade zu den gut beleuchteten, womit diese Variante wohl eher nicht zum Zuge kommen wird. Eine Energieversorgung aus dem Netz wird hier also unumgänglich sein.

Ähnlich verhält es sich auch bei der Funknetzbasisstation. Diese kann im Gegensatz zu den allgemeinen Sensorknoten nicht in einen passiven, wenig Strom verbrauchenden, Modus gesetzt werden, da sie immer zum Empfang allfälliger Signale der Sensorknoten bereit sein muss. Weiters wird sie, wie bereits in Abbildung 3-5 dargestellt, über den Neuron Chip 3150 an das LonWorks Feldbussystem gekoppelt. Auch hier muss eine Kommunikation zur Funknetzsteuerung jederzeit möglich sein. Der Einsatz von Solarzellen ist zwar grundsätzlich möglich, hängt aber wiederum vom Standort der Montage ab.

Im Kapitel 3.2 habe ich im Zusammenhang mit der Halbleitersuche die Arbeit von Friedl erwähnt. An dieser Stelle möchte ich näher darauf zu sprechen kommen. Wie schon erwähnt wurde dabei als Funktransceiver der CC1010 der Firma Chipcon verwendet. Bei allen Möglichkeiten, die der Chip zum Einsatz in low power Anwendungen bietet, hat die ganze Sache einen Haken. Die minimalste Stromaufnahme von  $0.2\mu\text{A}$  hat der CC1010 in seinem Power-Down Modus. Aus diesem kann sich der Chip nicht selber wieder in den normalen Betrieb schalten, lediglich durch einen Reset ist eine Wiederaufnahme des Aktivzustandes möglich. Dies muss von außen z. B. über einen Timerbaustein oder ähnliches erfolgen. Friedl wählte hier eine gelungene Kombination zweier Halbleiter, zum einen den CC1010 zum anderen einen low power Mikrocontroller der Firma Texas Instruments mit einer Stromaufnahme von  $200\mu\text{A}$  im aktiven Betrieb. Dessen wichtigste Daten sind in Tabelle 3-3 dargestellt.

Ein low power Funksensorknoten lässt sich damit mit zwei Halbleitern realisieren. Der MSP430 übernimmt mittels eingebautem Analog/Digital Konverter die periodische Messung der Temperatur. Über digitale I/O's lassen sich auch die Impulse der S0-Eingänge zählen.

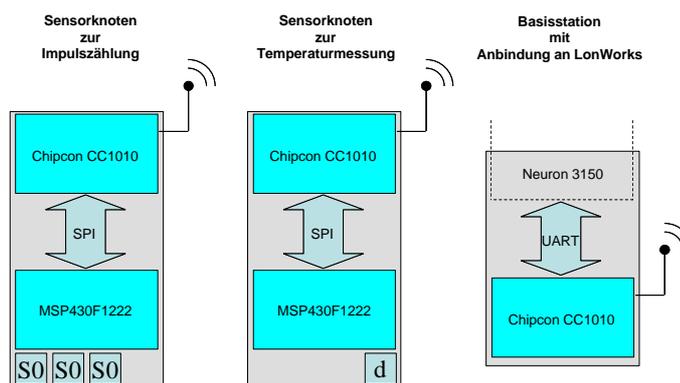
Steht eine Übertragung von Sensordaten an, wird der Transceiver CC1010 vom MSP wieder in den aktiven Modus versetzt. Die Übertragung der gemessenen Werte erfolgt dabei über die SPI-Schnittstelle, die beiden Chips zu eigen ist.

Type/Hersteller	Spannungsbereich/ Stromaufnahme	Sonstige Daten
MSP430F1222 Texas Instruments Inc. www.ti.com	Spannung: 1.8 - 3.6 V Ruhe/Standby: 0.7 $\mu$ A Aktiv: 200 $\mu$ A	16 Bit RISC Architektur 8 kByte Flash-Speicher 10 Bit ADC UART SPI RTC digitale I/O

**Tabelle 3-3: MSP430F1222, low power Mikrocontroller**

Nach erfolgter Funkübertragung versetzt sich der CC1010 wieder in der Power-Down Modus, während der MSP seine Messtätigkeit fortführt. Zwischen den einzelnen Messschritten kann auch der MSP in seinen Ruhezustand, mit einer Stromaufnahme von 0.7  $\mu$ A, versetzt werden. Dieser ist im Gegensatz zum Chipcon in der Lage sich selbstständig mittels Timer-Interrupt Signal wieder in den Aktivbetrieb zu versetzen.

Abbildung 3-6 zeigt schematisch die drei Grundelemente des Sensorfunknetzwerkes. Die zwei verschiedenen Sensorknoten mit Impulszählung bzw. Temperaturmessung, sowie die Basisstation mit der seriellen Anbindung zum LonWorks-Feldbussystem.



**Abbildung 3-6: Grundelemente des Funknetzwerkes**

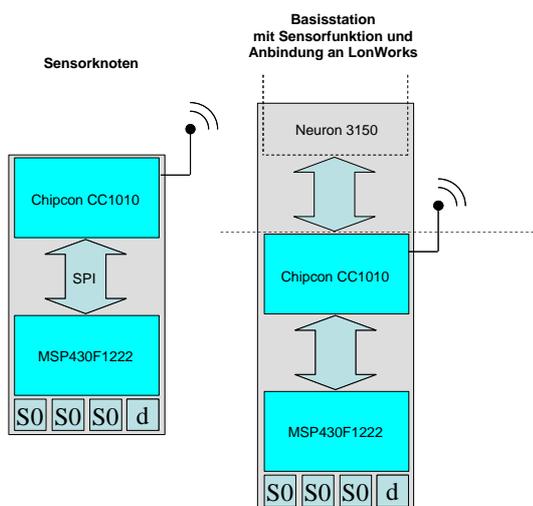
Die Hardware der beiden Sensortypen unterscheidet sich nur wenig. Es bleibt zu prüfen, ob eine Unterscheidung überhaupt lohnt. Die S0-Eingänge werden mittels weniger passiver Bauelemente realisiert, ebenfalls die Möglichkeit zur Temperaturmessung. Eine Referenzspannung zum Betrieb eines Temperaturfühlers ist im MSB bereits vorhanden.

Lediglich die Spannungsversorgung laut S0-Spezifikation würde also die beiden Sensorknotentypen unterscheiden.

In Bezug auf die Schaltplanerstellung und PCB-Fertigung (Leiterplattenfertigung) lohnt eine Trennung auf keinen Fall. Bei der Bestückung können später die überzähligen Bauteile einfach weggelassen werden. Blicke noch die Programmierung des MSP zur Messung und die Berücksichtigung der unterschiedlichen Daten im Protokoll des CC1010. Wobei auch hier eventuell eine einheitliche Lösung möglich scheint. Darauf wird jedoch an späterer Stelle noch näher eingegangen.

Bei einer solcherart Zusammenfassung der Funktionen, lohnt auch eine Unterscheidung im Aufbau der Basisstation nicht. Der zu einer Pegelanpassung der seriellen Kommunikation (UART) zum Neuron 3150 notwendige Konverter, kann auch auf der Platine des Neuron-Chips angebracht werden. Auch die Basisstation kann mit einem MSP gekoppelt werden, da diese nicht in den Power-Down Modus geschaltet wird, entfällt hier die entsprechende Funktion zwischen MSP und CC1010. Lediglich die Messwerte werden zwischen den beiden Chips per SPI-Schnittstelle übertragen.

Abbildung 3-7 zeigt nun das Schema der Funknetzwerkelemente nach einer Zusammenfassung der Funktionen. Die strichlierte horizontale Linie kennzeichnet bei der Basisstation die oben erwähnte Grenzlinie zur seriellen Schnittstelle zu LonWorks. Auf die Unterschiede in den Kommunikationsprotokollen zwischen Sensorknoten und Basisstation wird an späterer Stelle eingegangen.



*Abbildung 3-7: Zusammenfassung der Funktionen*

### 3.5 Kommunikationsschnittstellen

Im vorangegangenen Kapitel wurde die Notwendigkeit von Kommunikationsschnittstellen zwischen den einzelnen Halbleiterelementen erläutert. Dabei wurden zwei serielle Typen erwähnt, die SPI-Schnittstelle zur Kommunikation zwischen MSP und Chipcon-Chip, sowie die UART-Schnittstelle zur Verbindung von Chipcon und Neuron-Chip bei der Basisstation. In diesem Kapitel möchte ich auf die Unterschiede der Schnittstellentypen näher eingehen.

Die Verbindung zwischen MSP und Chipcon erfüllt im Fall der Sensorknoten zwei Aufgaben:

1. Ausführen eines Resets um den Chipcon aus dem Power-Down in den Aktivzustand zu versetzen.
2. Die bidirektionale Kommunikation mittels SPI

Das linke Teilbild von Abbildung 3-8 zeigt das Schema der Schnittstelle für einen Sensorknoten. Die Reset-Leitung bzw. zur Synchronisation zwischen Chipcon und MSP benötigte Verbindungen werden aus programmierbaren I/O's auf beiden Seiten gebildet. Eine Ausnahme bildet hier die Reset-Leitung, die auf der Chipcon-Seite direkt am Reset-Anschluss mündet. Die SPI-Kommunikationsleitungen werden mit den damit auf beiden Halbleitern vorgesehenen Ports gebildet. Auf die genaue Funktion der einzelnen Leitungen wird im Kapitel 4.5.1 eingegangen.

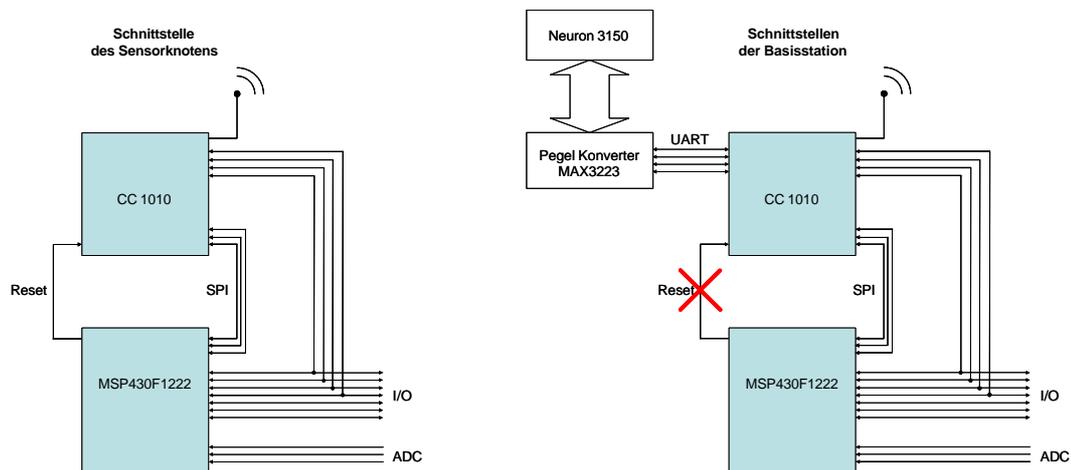


Abbildung 3-8: Schema der Schnittstellen

Im Falle der Basisstation wird die SPI-Schnittstelle zur Messdatenübertragung ebenfalls benötigt. Hier entfällt jedoch die Reset-Leitung, da der Chipcon die ganze Zeit empfangsbereit sein muss und nicht in den Power-Down Modus versetzt wird. Bei Verwendung eines PCB-Layouts muss eine entsprechende Vorkehrung getroffen werden, bzw. bei der Programmierung des MSB der diesbezügliche Programmteil nicht ausgeführt werden.

In rechten Teilbild von Abbildung 3-8 ist das Schema der Schnittstellen für die Basisstation skizziert. Die zur Realisierung der UART-Schnittstelle notwendigen Verbindungen müssen beim Entwurf des PCB-Layouts an geeigneter Stelle ausgeführt werden.

### 3.6 Synchronisation der einzelnen Knoten

Ein wichtiger Punkt der Aufgabenstellung besteht in der Einhaltung der Messperioden für die Verbrauchsgutmessung. Wie schon in der Einleitung erwähnt wird dazu der

Synchronimpuls der EVU herangezogen. Die Detektion dazu wird mittels eines S0-Einganges an der Basisstation vorgesehen. Der Basisstation obliegen nun zwei Aufgaben:

1. Die Weiterleitung des Zeitpunktes des Synchronimpulses an den Neuron-Chip zum späteren Eintrag in die Internetdatenbank.
2. Die Synchronisation aller Sensorknoten.

Die Erfüllung der ersten Aufgabe stellt kein großes Problem dar. MSP und Chipcon kommunizieren per SPI, die Weiterleitung an den Neuron-Chip wird dann auf direktem Weg über die UART vom Chipcon erledigt.

Anders sieht es bei der zweiten Aufgabe aus. Die bis zu 32 vorzusehenden Temperatur-sensorknoten befinden sich, wie schon im Kapitel 3.1 erläutert, die meiste Zeit im stromsparenden power-safe Betrieb. Lediglich zur Aufnahme der Kommunikation ist eine Synchronisation möglich. Der Zeitpunkt des letzten Synchronimpulses liegt dann jedoch eine wesentliche Zeitspanne in der Vergangenheit. Erschwerend kommt noch hinzu, dass die Synchronimpulse zwar etwa alle 15 Minuten von den EVU's gesendet werden, aber eben nur etwa. Hier können Abweichungen in Minutengröße auftreten. Zwei Möglichkeiten diesen Sachverhalt zu integrieren standen zur Diskussion:

1. Die Sensorknoten werden in relativ kurzen periodischen Abständen aus dem power-safe Betrieb auf Empfang geschaltet. Die Dauer zum periodischen Lauschen richtet sich nach der vertretbaren Toleranz zur Einhaltung der Messperioden. Damit ergibt sich allerdings ein erheblich höheres Taktverhältnis zwischen aktiver und Ruheperiode des Sensorknotens mit einer drastischen Verkürzung der Batteriebensdauer.
2. Eine andere Variante ergibt sich durch das Konzept der Speicherung in einer Internetdatenbank. Dort werden einerseits die Zeitpunkte der Synchronimpulse protokolliert und andererseits die Anzahl von Verbrauchsgutzählimpulsen und Temperaturwerte in periodischen Abständen. Eine Interpolation der Daten mit den Synchronimpulsen stellt hier kein Problem dar. Eine Abweichung der einzelnen Messperioden von der Periode der jeweiligen Synchronimpulse kann also in Kauf genommen werden. Entsprechende Rückfragen beim Auftraggeber bestätigten den Einsatz dieses Konzeptes.

Jeder Sensorknoten benötigt eine RTC. Keine Uhr geht genau, wie allgemein bekannt ist, das System soll jedoch jahrelang wartungsfrei arbeiten können, wobei eine Uhr auch Quartsbasis in 24 Stunden durchaus um mehrere Sekunden falsch gehen kann. Das Problem der Synchronisation der Knoten in Bezug auf den Synchronimpuls der EVU's ist soweit diskutiert, es bleibt noch offen alle mitlaufenden RTC der Sensorknoten auf eine gemeinsame Basis zu bringen.

Die Problematik der Uhrsynchronisation, bzw. der Prozesssynchronisation, ist in so genannten Verteilten Systemen nicht trivial zu lösen. Verschiedene spezielle Algorithmen dazu können in [TAS03] und [WEB98] nachgelesen werden.

Folgendes Szenario wäre in unserem Fall zur Lösung dieses Problems denkbar: Die zentrale Uhrzeit des Funknetzes wird von der Basisstation zur Verfügung gestellt, die ihrerseits in ihrer Richtigkeit vom Neuron Chip geführt werden kann. Die Synchronisation der Sensorknoten übernimmt die Basisstation an geeigneten Zeitpunkten, die es

noch zu klären gibt. Dabei muss sichergestellt werden, einerseits dass neu in Betrieb genommene Sensorknoten die richtige Uhrzeit übermittelt bekommen, und andererseits auch wissen, wann eine Übertragung ihrer Messwerte durchzuführen ist. Zur genauen Synchronisation wären diverse Reaktionszeiten der Teilsysteme zu berücksichtigen. Jedoch ist in unserem Fall ein Fehllauf der einzelnen Knoten in der Höhe von einer Sekunde laut Auftraggeber tolerierbar, eine Synchronisation hat also innerhalb dieses Zeitfensters zu erfolgen.

Entsprechende Kommandos müssen dazu in den Übertragungsprotokollen und auch in der Schnittstellenkommunikation zwischen den Knotenchips vorgesehen werden. Der genaue Ablauf, bzw. die Kommandos der Realisierung werden an späterer Stelle erläutert.

### 3.7 Stromverbrauchsanalyse

An dieser Stelle, nachdem die Hardware feststeht, Unterschiede der verschiedenen Sensorknoten diskutiert und auch die Besonderheiten der Basisstation beschrieben wurden, kann eine vorläufige Untersuchung der Höhe des zu erwartenden Stromverbrauches bereits durchgeführt werden. Die Ergebnisse lassen sich zu einer Schätzung der Batterielevensdauer im Falle des Temperaturknotens und die Dimensionen der Energieversorgung im Falle der Basisstation sowie Sensorknoten zur Impulsmessung heranziehen.

Zu berücksichtigende Größen sind dabei die Stromaufnahmen der eingesetzten Halbleiter und die der bereits bekannten Peripheriebauteile bei den verschiedenen Betriebsmodi. Während im Fall einer Versorgung aus dem Netz die Höhe der maximalen Stromaufnahme interessiert, ist es bei Batteriebetrieb bzw. einer Versorgung aus Solarzellen die Stromaufnahme gemittelt über einen gewissen Zeitraum. Mit diesen Daten lässt sich einerseits die zu erwartende Batterielevensdauer, andererseits die zu dimensionierende Größe eines Solarmoduls mit Energiespeicherung ermitteln.

Der Wechselbetrieb zwischen Aktiv- und Ruhezustand der einzelnen Elemente lässt sich mit der Methode des Taktverhältnisses, wie schon im Kapitel 3.1 erläutert, für die Berechnung berücksichtigen. Während das Taktverhältnis des Hochfrequenzteils für den Dauerbetrieb der Basisstation bei eins liegt, ergibt es sich im Fall eines Temperatursensorknotens zu etwa 0.0067 (siehe Kapitel 3.1) und im Fall eines reinen Impulsensorknotens zu etwa 0.0022 (zwei Sekunden angenommene Aktivphase alle fünfzehn Minuten).

Aber nicht nur der Sende/Empfangsteil der Knoten muss berücksichtigt werden, sondern auch der Betrieb des Messteils, der mit dem MSP430 der Firma Texas Instruments realisiert wird. Auch dieser wird im Wechselbetrieb eingesetzt, allerdings zu unterschiedlichen Taktverhältnissen. Um bei einem Temperaturknoten auf das Überschreiten einer Werteschwelle reagieren zu können, muss auch zwischen den Hauptsendeintervallen eine Messung durchgeführt werden. Hier errechnet sich die Dauer der Aktivphase aus der Zeit für das Aufwachen des MSP plus der Einschwingzeit zur Versorgung des Temperaturfühlers und schließlich aus der Messzeit des ADC-Konverters. Alle diese Werte lassen sich aus den Datenblättern der betreffenden Halbleitern entnehmen.

Die, bis dato mit zwei Sekunden angenommene, dauernde Aktivphase für den Kommunikationsbetrieb ergibt sich aus der Zeit die der Chipcon für das Aufwachen benötigt, plus der Zeit für das Übertragen der zu sendenden Werte vom MSP zum

Chipcon und schließlich aus der Zeit für das Übersenden selbst. Diese Zeit lässt sich an dieser Stelle nur grob schätzen. Bekannt sind lediglich die Aufwachzeiten des Chipcon und die Zeiten, die sich bei einer wohl definierten Datenrate bei reiner Kommunikation einer zu erwartenden Informationseinheit von etwa 20 Bit ergeben. Gänzlich unbekannt sind jedoch die Zeiten, die sich durch das Protokoll zusätzlich ergeben. Deshalb sei an dieser Stelle mit zwei Sekunden eine vorsichtige Schätzung für die Aktivphase eingesetzt.

In Abbildung 3-9 ist nun eine vorläufige Stromverbrauchsanalyse dargestellt. Der S0-Eingang wurde dabei jeweils nur einmal berücksichtigt. Bei einem Vollausbau mit drei Eingängen, wie er z. B. bei der Basisstation durchaus zu erwarten ist, steigt der Stromverbrauch entsprechend an. Weiters wurde hier ein Taktverhältnis von 50 % eingesetzt, was den ungünstigsten Fall darstellt.

Im Fall des Temperaturknotens wurde als Batterieversorgung der Einsatz von Batterien der Baugröße LR 3 (Micro oder AAA) in Alkalineausführung angenommen. Die Herstellerangaben bezüglich der Kapazität schwanken im Bereich von 900 - 1500 mAh. Ein mittlerer Wert von 1200 mAh wurde hier eingesetzt, wobei üblicherweise nur 80 % effektiv nutzbarer Kapazität für die weitere Rechnung berücksichtigt wurden.

Wesentlichen Einfluss auf die Batterielebensdauer hat die schon erwähnte Aktivperiode des Chipcon-Chips, hier mit zwei Sekunden geschätzt. Diese Dauer hängt im wesentlichen Maße von der Protokollimplementierung ab. Gelingt es z. B. die Zeit auf 1.4 Sekunden zu verkürzen, könnte eine Verlängerung der Batterielebensdauer auf über 560 Tage erzielt werden.

Statt Batterien der Type LR 3 lassen sich natürlich auch größere Typen, wie z. B. LR 6 (Mignon oder AA), womit etwa eine Verdopplung der Einsatzmöglichkeit erzielt werden kann.

Der Einsatz eines Solarmodules zur Energieversorgung erscheint auch bei der Basisstation bzw. bei einem Impulszählknoten denkbar. Der maximale Strombedarf von etwa 25 mA (bei einem S0-Eingang) stellt hier keine allzu große Hürde dar. Man muss lediglich bedenken, dass S0-Eingänge eine Spannungsversorgung von mindestens 12 V benötigen. Die Dimensionierung eines Solarmodules muss auch die unweigerlich auftretenden Dunkelphasen mitberücksichtigen, die es zu überbrücken gilt.

	<b>Basisstation</b>	<b>Temperaturknoten</b>	<b>Impulszählknoten</b>	
<b>Temperaturfühler</b>				
Netzwerk mit 150k Ersatzwiderstand				
Stromverbrauch aktiv	0,02	0,02	0,02	mA
Stromverbrauch ruhe	0	0	0	mA
Messdauer	1	1	1	ms
Messzyklus	60	60	60	s
Taktverhältnis	0,00167	0,00167	0,00167	%
<b>mittlerer Stromverbrauch</b>	<b>3,34E-07</b>	<b>3,34E-07</b>	<b>3,34E-07</b>	<b>mA</b>
<b>Chipcon CC1010</b>				
Stromverbrauch aktiv	15	15	15	mA
Stromverbrauch ruhe	0,0002	0,0002	0,0002	mA
Aktivdauer	2	2	2	s
Periode	2	300	900	s
Taktverhältnis	100	0,6711	0,222	%
<b>mittlerer Stromverbrauch</b>	<b>7,50</b>	<b>0,10</b>	<b>0,03</b>	<b>mA</b>
<b>MSP 430</b>				
Stromverbrauch aktiv	0,2	0,2	0,2	mA
Stromverbrauch ruhe	0,0007	0,0007	0,0007	mA
Aktivdauer	1	1	1	ms
Periode	1	1	1	s
Taktverhältnis	0,1	0,1	0,1	%
<b>mittlerer Stromverbrauch</b>	<b>8,99E-04</b>	<b>8,99E-04</b>	<b>8,99E-04</b>	<b>mA</b>
<b>S0-Eingang</b>				
Stromverbrauch aktiv	10		10	mA
Stromverbrauch ruhe	2,5		2,5	mA
Aktivdauer	100		100	ms
Periode	200		200	ms
Taktverhältnis	50		50	%
<b>mittlerer Stromverbrauch</b>	<b>5</b>		<b>5</b>	<b>mA</b>
<b>maximaler Stromverbrauch</b>	<b>25,22</b>	<b>15,22</b>	<b>25,22</b>	<b>mA</b>
<b>gesamter mittlerer Stromverbrauch</b>	<b>12,50</b>	<b>0,10</b>	<b>5,03</b>	<b>mA</b>
<b>Batteriekapazität</b>		1200		mAh
verfügbare Kapazität (80%)		960		mAh
<b>Batterielebensdauer</b>		<b>395,68</b>		<b>Tage</b>

Abbildung 3-9: Stromverbrauchsanalyse



# Kapitel 4

## Realisierung

Im vorliegenden Kapitel wird auf Details zur Realisierung insbesondere der Software aber auch der Hardware eingegangen. Dabei stützt sich die Entwicklung des Sensorfunknetzwerkes auf die bereits im Kapitel 3.2 erwähnte Diplomarbeit von Dipl.-Ing. Andreas Friedl. Die dabei verwendete Hardware, bestehend aus jeweils einem Sendemodul und einem Modul zur Übernahme von Mess- und Steuerungsaufgaben, wird auch hier als Grundlage zur Entwicklung des Kommunikationsprotokolls, sowie der Algorithmen zur Messwerterfassung und Funkteilsteuerung eingesetzt. Die Erstellung eines eigenständigen PCB, zur Aufnahme aller Funktionen, wurde nicht weiter verfolgt. Die Präsentation der geforderten Funktionalität konnte auch mit den vorliegenden Hardwarekomponenten vorgenommen werden. Dazu notwendige Änderungen der Hardware wurden einerseits direkt an den verfügbaren PCB's andererseits mit der Hilfe von Zusatzboards ausgeführt. Ein vollständiger Schaltungsentwurf ist im Anhang zu finden und kann, zusammen mit den Vorgaben zur Dimensionierung eines PCB des Hochfrequenzteiles um den Chipcon Transceiver, leicht zum Aufbau einer Platine herangezogen werden.

Wie in der Abbildung 3-7 ersichtlich, haben sich nach Zusammenfassung der geforderten Funktionen, zwei grundlegende Typen von Funkknoten ergeben. Einerseits der Typ des reinen Sensorknotens, der die Wahrnehmung der Temperaturmessung und/oder Impulzzählung übernimmt und andererseits der Typ der Basisstation, der den Empfang von Daten seiner Sensorknoten durchführt und diese an das Feldbussystem LonWorks zur späteren Übersendung per GSM weiterleitet. Auch kann eine Basisstation zur Messwerterfassung herangezogen werden, insbesondere ist sie speziell zur Detektion und Weiterleitung von Synchronimpulsen der EVU's vorgesehen (siehe dazu das Kapitel 3.6).

Der Inhalt des vorliegenden Abschnitts geht beginnend mit einer detaillierten Beschreibung der Vorgaben auf die Entwicklung bzw. Anpassung des Funkkommunikationsprotokolls ein. Vorgestellt werden die Protokollhierarchie, Kommunikationsabläufe, Schnittstellen und Dienste der einzelnen Schichten einer Basisstation als auch eines Sensorknotens. Die Durchführung aller Funktionen bezüglich des Funkprotokolles nimmt dabei der Funktransceiver CC1010 der Firma Chipcon wahr. Das zur Programmierung und Programmverifikation eingesetzte Entwicklungsinstrumentarium wie auch die verwendete Hardware, das Sendemodul, wird vorgestellt. Dabei wird auch auf Besonderheiten bzw. Schwierigkeiten, die sich bei deren Einsatz ergeben haben, gesondert hingewiesen.

Das Messmodul wird mit dem low power Mikrocontroller MSP430F1222 der Firma Texas Instruments Inc. gebildet. Der Umfang des Anwenderprogrammes zur Messwert-erfassung, des Betriebes einer RTC sowie zur Steuerung des Sendemoduls um den CC1010, ist im Umfang wesentlich geringer als das Kommunikationsprotokoll, erfordert jedoch auch die Einarbeitung in eine gänzlich andere Entwicklungsumgebung. Deren Vorstellung stellt ebenso einen Inhalt dieses Kapitels dar, wie auch die Beschränkungen, die sich beim Debugging durch ihren Einsatz ergeben haben. Die Notwendigkeit zusätzlicher Hardware zum Betrieb des geforderten Temperatursensors sowie die

detaillierte Beschreibung zur Aufbau von Impulszähleingängen mit S0-Spezifikation stellen schließlich den Abschluss des Kapitels dar.

## 4.1 Vorgaben

Bevor mit den Details zur Realisierung fortgefahren wird, möchte ich an dieser Stelle die Vorgaben zum Aufbau des Sensorfunknetzes zusammenfassen. Die Aufgabenstellung ist eher allgemein gehalten und geht im Detail lediglich auf den zu verwendeten Temperatursensortyp, die zeitliche Messwerterfassung und die Anzahl der Sensorknoten ein. Ein weiterer zu beachtender Punkt ist die Einhaltung einer Kostenobergrenze, bezogen jeweils auf einen zu realisierenden Funkknotentyp. Stromsparmassnahmen, sowie die Überprüfung des möglichen Einsatzes einer alternativen Energieversorgung müssen ebenfalls beachtet werden.

Zusammen mit den Analysepunkten des Kapitels 3 lassen sich die wesentlichen Randbedingungen wie folgt ableiten:

1. Der Einsatz des Funknetzes soll über Jahre hinweg sichergestellt sein. Hard- und Software sind dahingehend zu konzipieren, dass auch ein Betrieb eines Sensorknotens über diesen Zeitraum gewährleistet ist. Das Funkprotokoll ist demnach auf effiziente und rasche Abläufe auszulegen. Notwendige kurze Aktivperioden der Knoten implizieren rasche Protokollabläufe und kurze Datenübertragungszeiten.
2. Die Grundelemente des Funknetzes bestehen aus einer Basisstation und aus mehreren Sensorknoten. Die Kommunikation erfolgt dabei immer nur zwischen der Basisstation und jeweils einem Funkknoten. Eine Datenübertragung zwischen einzelnen Funkknoten ist nicht vorgesehen.
3. Die Energieversorgung der Funkknoten erfolgt primär mit Batterien, mit Ausnahme solcher mit S0-Eingängen. Der Datentransfer wird dabei von den Funkknoten aus aktiviert, da sich diese die meiste Zeit aus Energiespargründen im Ruhezustand befinden. Die Basisstation hingegen erfordert eine Versorgung über das Netz und muss auch ständig empfangsbereit sein.
4. Die Datenübertragung ist für ein festes vorgegebenes Zeitmuster zu realisieren. Mit der Anbindung des Funknetzes an ein LonWorks-Feldbussystem soll dennoch eine Änderung der Parameter während des Betriebes möglich sein. Damit ergibt sich die Notwendigkeit der bidirektionalen Kommunikation zwischen den Sensorknoten und einer Basisstation.
5. Die einzelnen Knoten müssen anhand ihrer Daten identifiziert werden können. Dazu ist eine Adressierung der Knoten vorzunehmen, mit deren Hilfe auch die Verwaltung von einer Basisstation aus erfolgen kann. Die Adressierung soll dabei einfach vorgenommen und gegebenenfalls auch rasch geändert werden können.
6. Die Mechanismen des Medienzugriffs sind aufgrund der Topologie des Netzwerkes zu definieren. Die Art und Weise der Datenübertragung ist in Hinblick auf eine sichere Kommunikation aufzubauen.
7. Um einen Betrieb auf Jahre hinaus sicherzustellen, sind An- und Abmeldevorgänge der Knoten an eine Basisstation zu implementieren, die auch im Fehlerfall eine selbständige Reorganisation des Netzes ermöglichen. Bei-

spielsweise soll auch nach Ausfall einer Basisstation eine Anmeldung der Knoten an eine andere verfügbare Basisstation möglich sein.

8. Die zeitliche Synchronisation der einzelnen Knoten stellt einen wesentlichen Aspekt der Aufgabenstellung dar. Mechanismen zur Uhrenstellung aller eingesetzter Knoten, bzw. die Weiterleitung des Synchronisierzeitpunktes sind vorzunehmen.

Die grundlegenden Eigenschaften des Funknetzes sind damit definiert. In den nachfolgenden Kapiteln erfolgt die nähere Beschreibung der gewählten Realisierung.

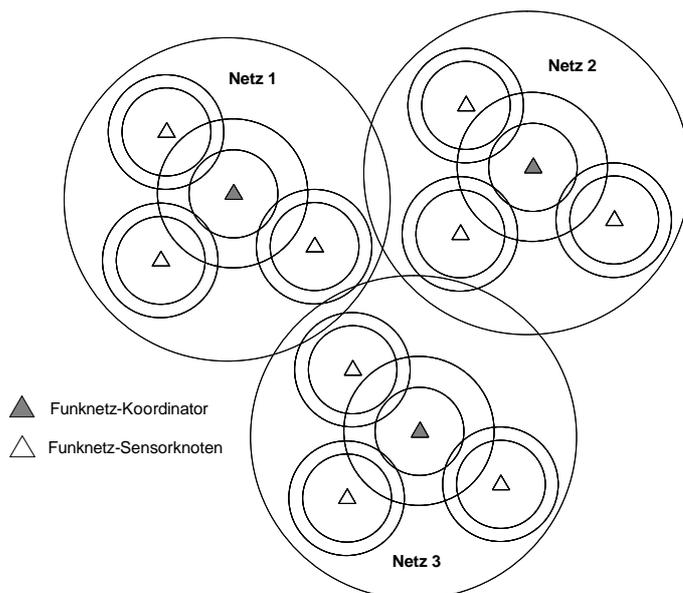
## 4.2 Netzwerk / Kanalzugriffsverfahren

In Abbildung 4-1 ist die zugrunde liegende Topologie des Funknetzwerkes abgebildet. Jeder der abgebildeten Funknetz-Koordinatoren bildet die Basisstation für seine Sensorknoten. Diese übermitteln ihre Daten direkt an ihn ohne benachbarte Sensorknoten, bzw. Basisstationen in die Kommunikation mit einzubeziehen. Jedes der abgebildeten Unternetze bildet damit eine sternförmige Netzwerktopologie. Grundsätzlich ist es möglich mehrere Basisstationen in einer Installation zu betreiben. Jede einzelne muss jedoch mittels serieller Kommunikation an das LonWorks-Bussystem angeschlossen werden um ihre Daten übermitteln zu können. Die dabei verwendete Adressierung und Anbindung der einzelnen Sensorknoten an eine Basisstation werden im Kapitel 4.4 erläutert.

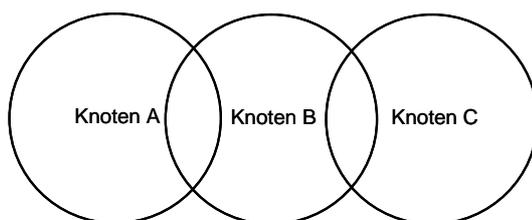
Das realisierte Kanalzugriffsverfahren ist CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance). Dabei wird das Übertragungsmedium vor jedem Sendeversuch von der Sendestation abgehört. Ist das Medium gerade besetzt, d.h. wird ein Empfang registriert, wartet die Sendestation eine zufällige Zeitdauer und hört das Medium wiederum ab. Ist das Medium frei, wird sofort mit der Übertragung begonnen. Trotz dieses Mechanismus ist die Gefahr einer Kollision groß. Insbesondere beim so genannten Hidden-Node Problem (Abbildung 4-2) [SHAH03].

Die Problematik, die sich hier darstellt ist folgende: Die Knoten A und C befinden sich nicht in einer sich überschneidenden Reichweite, sie „wissen“ demnach nicht voneinander. Bei einem Versuch beispielsweise des Knotens A zu senden, wird das Medium von ihm als frei empfunden, auch wenn der Knoten C gerade eine Kommunikation zum Knoten B durchführt. Der Knoten A wird also den Sendevorgang starten, obwohl der Knoten B gerade mit dem Empfang der Information des Knotens C beschäftigt ist.

Eine Umgehung dieses Problems beim gewählten Kanalzugriffsverfahren besteht nun darin, dass bei einem Sendeversuch eine Bestätigung der Empfangsstation ausbleibt. Wird nun nach Ablauf einer bestimmten Wartezeit (Timeout) keine Empfangsbestätigung vermeldet, wird die anstehende Information wiederum gesendet. Bei synchronen Zugriffen passiert nun das gleiche wie zuvor, keine Station kann ihre Information weiterleiten und das Medium ist trotzdem blockiert. Solcherart Kollisionen lassen sich vermeiden indem statt nach einer fixen nach einer zufälligen Wartezeit ein neuerlicher Zugriff auf das Sendemedium verfahren wird. Da die Auslastung des Mediums und auch die Sendezeiten in unserem Fall eher gering sind ist diese Methode zur Kollisionsbehandlung gut geeignet.



**Abbildung 4-1: Funknetztopologie**



**Abbildung 4-2: Das Hidden-Node Problem**

### 4.3 Kommunikationsabläufe / Datensicherung

Nachdem die grundlegenden Elemente, sowie die Topologie des Funknetzes feststehen (siehe dazu die Kapitel 3.4 und 4.2) lassen sich daraus unmittelbar die Möglichkeiten zur Kommunikation über das Medium Funk ableiten. Betrachten wir ein dazu ein Unternetz, wie es in Abbildung 4-1 dargestellt ist. Ein solches besteht aus einer Basisstation und mehreren Sensorknoten. Der Betrieb der Sensorknoten wechselt dabei zwischen Aktiv- und Ruheperiode, während sich die Basisstation, aus Gründen der Empfangsbereitschaft, immer im Aktivbetrieb befindet. Ein Sensorknoten kann lediglich in seiner Aktivperiode eine Kommunikation per Funk durchführen, die Basisstation kann dies jederzeit. Aus dieser wichtigen Tatsache lässt sich erkennen, dass ein Kommunikationsablauf nur durch einen Sensorknoten initiiert werden kann. Nur zu diesen Zeitpunkten kann die Basisstation Daten an den Sensorknoten senden, werden diese zu anderen Zeitpunkten abgesetzt, gehen sie unweigerlich verloren.

Das Schema der möglichen Kommunikationsbeziehungen zeigt die Abbildung 4-3. Das linke Teilbild stellt dabei eine Datenübertragung von einem Sensorknoten zur Basisstation dar. Im rechten Teilbild wird durch eine Anfrage einer Sensorstation eine Datenübermittlung von der Basisstation zum anfragenden Sensorknoten dargestellt. Es

ergibt sich von selbst, dass eine Zwischenspeicherung von erforderlichen Daten in der Basisstation zu dieser Art der Kommunikation vorgesehen werden muss.

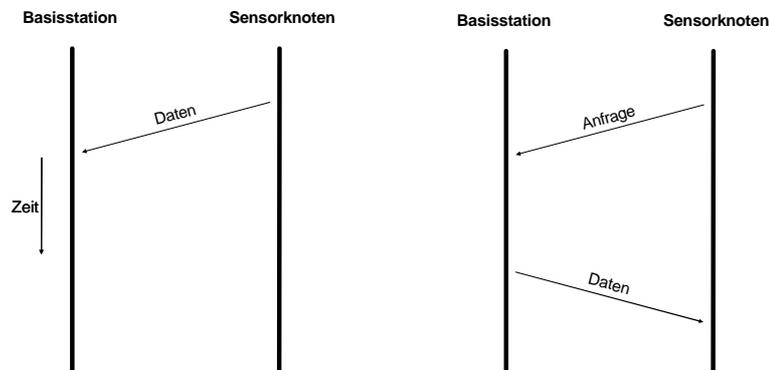


Abbildung 4-3: Kommunikationsbeziehungen zwischen Basisstation und Sensorknoten

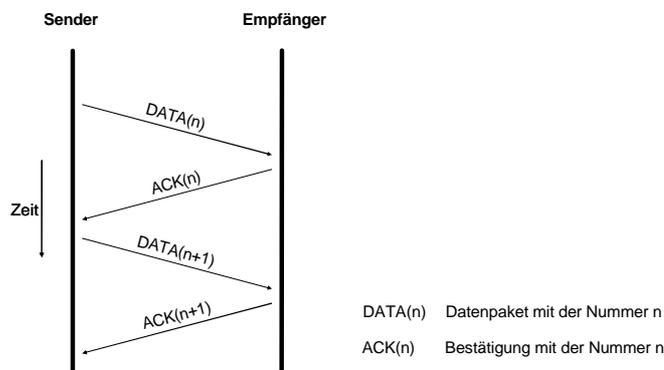
Zum grundlegenden Ablauf der Kommunikation per Funk ergibt sich noch der wichtige Aspekt der Sicherstellung der Richtigkeit der Datenübertragung. Jedes Übertragungsmedium beinhaltet eine Fülle von Störungsquellen, z. B. Interferenzen, Reflexionen, Nebensprechen, Fading (Näheres dazu in [WEI98]). Daten können dadurch fehlerhaft übertragen werden oder gänzlich verloren gehen. Eine Art der Datensicherung wurde bereits im Kapitel 4.2 mit der Art des Kanalzugriffverfahrens CSMA/CA vorgestellt. Informationen werden nur dann abgesetzt, wenn das Übertragungsmedium augenscheinlich unbesetzt ist. Aber auch dann kann Information verloren gehen (siehe dazu das Hidden-Node Problem im Kapitel 4.2). Es gilt nun durch Mechanismen im Ablauf der Kommunikationssteuerung eine fehlerfreie Datenübertragung sicherzustellen.

Die erste Maßnahme besteht im Hinzufügen von redundanter Information zum eigentlichen Dateninhalt. Dies geschieht durch einen Cycle Redundancy Check (CRC), der Berechnung einer Prüfsumme. Der Sender berechnet diese anhand des Informationsinhaltes und eines definierten Algorithmus. Diese Prüfsumme wird zusätzlich mit dem Dateninhalt an den Empfänger übermittelt, wo dieser in umgekehrter Weise anhand der erhaltenen Prüfsumme die Fehlerfreiheit der Daten erkennen, bzw. nach Art der Implementierung der Prüfsumme, sogar Fehler korrigieren kann. Angewendet wurde dazu ein 16Bit CRC-Algorithmus, aus der Software Bibliothek HAL (siehe Kapitel 4.9.1) der Firma Chipcon. Fehlerhafte Bitfolgen bis zu einer Länge von 16Bit werden damit mit Sicherheit erkannt. Sind die Bitfolgen länger besteht noch immer eine hohe Wahrscheinlichkeit Fehler zu erkennen.

Mit Hilfe des CRC kann nun der Empfänger auf die Fehlerfreiheit von Daten schließen. Jedoch auch der Sender benötigt eine Information, dass seine übermittelte Daten richtig angekommen sind. Dazu wird eine Nachrichtenbestätigung, das so genannte Acknowledge (ACK) vom Empfänger an den Sender gesendet. Bleibt dieses aus, startet der Sender eine erneute Transaktion. Es handelt sich also um eine bestätigte Datenübermittlung, die als „Idle-Repeat-Request“ (Idle-RQ) bezeichnet wird.

Der Sender wartet dabei nach Übermittlung seiner Daten auf die Bestätigung deren fehlerfreien Übertragung, bevor ein neues Datenpaket gesendet wird. Zur eindeutigen Zuordnung der Bestätigungen ist eine Nummerierung übermittelter Datenrahmen notwendig. Sowohl der gesendete Datenrahmen als auch die dazugehörige Bestätigung

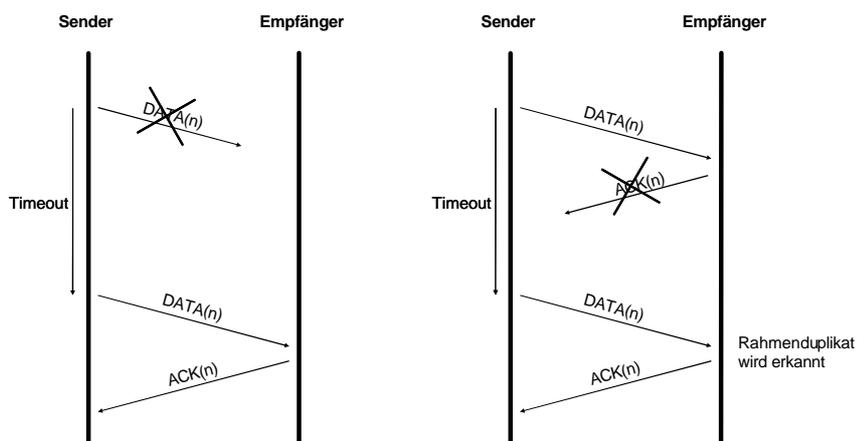
erhalten die gleiche Nummer (Sequence Number), damit ist ein Kommunikationsablauf eindeutig zuzuordnen (Abbildung 4-4).



**Abbildung 4-4: Schema einer bestätigten Datenübermittlung (Idle-RQ)**

Mögliche Fehler bei der Datenübertragung sind in Abbildung 4-5 dargestellt. Im linken Teilbild ist dabei der Verlust eines Datenpaketes dargestellt. Da der Empfänger keinerlei Information erhält, wird auch keine Bestätigung gesendet. Zur einwandfreien Erkennung dieses Umstandes wird bei der Übermittlung im Sender ein Timer gestartet. Ist nach Ablauf einer eingestellten Zeitspanne, des Timeout, keine Bestätigung eingetroffen, erkennt der Sender eine fehlerhafte Übertragung und startet eine erneute Übertragung des Datenpaketes. Im Falle eines erneuten Fehlers wird dieser Vorgang mehrmals wiederholt.

Das rechte Teilbild bezieht sich auf die Bestätigung eines eingetroffenen Datenpaketes, die der Empfänger zu übermitteln versucht. Auch hier wird dieser Umstand mit dem Ablauf des gleichen Timeout wie im vorigen Fehlerfall erkannt. Der Sender übermittelt daraufhin erneut das Datenpaket, worauf der Empfänger anhand der mit übermittelten Sequence Number das Rahmenduplikat erkennt. Er sendet die erforderliche Bestätigung und ignoriert das doppelte Datenpaket.



**Abbildung 4-5: Mögliche Übertragungsfehler bei Idle-RQ**  
 (links) Verlust eines Datenpakets bzw. (rechts) Verlust einer Bestätigung

Friedl verwendete in seiner Arbeit das hier gezeigte Verfahren, jedoch setzte er ein sehr kurzes ACK-Paket ein, das lediglich aus der Information zum Rahmentyp und einer 1Byte breiten Sequence Number besteht. Bei einem Einsatz mehrerer Sensorknoten und beim Versuch der gleichzeitigen Übermittlung kann es dabei leicht vorkommen, dass zwei oder mehr Sensorknoten die gleiche Sequence Number einsetzen (z. B. beim Hidden-Node Problem, Kapitel 4.2). Hat ein Knoten mit der Übertragung seiner Daten Erfolg, sendet der Empfänger seinerseits das nötige ACK-Paket. Dieses wird nun allerdings nicht nur vom ursprünglichen Sendeknoten, sondern auch von allen anderen Knoten, die auch eine entsprechende Antwort warten und sich in der Sendereichweite befinden, empfangen. Diesen Knoten wird nun fälschlicherweise eine fehlerfreie Paketübermittlung signalisiert. Als Korrektur dieses Umstandes wurde ein geändertes Rahmenformat eingeführt, das im Kapitel 4.8 genauer erläutert wird. Es enthält unter anderem auch die eindeutige Empfängeradresse, womit eine Fehlinterpretation bei gleicher Sequence Number ausgeschlossen wird.

#### **4.4 Adressierung und Assoziation**

Ein wesentlicher Aspekt beim Betreiben eines Funknetzes besteht in der eindeutigen Zuweisung jeweiliger Daten zu einem bestimmten Funkknoten. Friedl hat zu diesem Zweck für jeden Knoten per Software eine 48 Bit lange IEEE-Adresse vorgesehen, die jedoch nur bei der erstmaligen Anmeldung (Assoziation) an die betreffende Basisstation, verwendet wird. Die Basisstation vergibt per Plug & Play (PaP) ihrerseits für alle weiteren Kommunikationsabläufe eine ein Byte lange, im jeweiligen Unternetz (siehe Kapitel 4.2) eindeutige, Adresse. Mit dieser Vorgehensweise ergeben sich jedoch zwei gravierende Nachteile:

1. Die 48 Bit lange IEEE-Adresse muss bei der Programmierung des Flash-Speichers eines jeden einzelnen Chipcon Transceivers berücksichtigt werden und sollte eindeutig sein. Bei kleinen Serien, die per Hand programmiert werden, muss somit jedes mal als erstes die betreffende Stelle der Software adaptiert werden, danach das Programm kompiliert und zu guter Letzt der Chipspeicher programmiert werden. Diese Vorgehensweise stellt einen erheblichen Overhead bei der Fertigung dar.
2. Bei der Betreuung des Funknetzes muss die 48 Bit lange Adresse einerseits in der Basisstation zur eindeutigen Zuordnung gespeichert werden und andererseits bei der Weiterleitung von Daten an das LonWorks auch mitberücksichtigt werden. Eine Verwendung der durch den PaP-Algorithmus vergebenen ein Byte breiten Adresse ist nicht ziel führend, da diese dynamisch vergeben wird und sich bei neuerlicher Anmeldung an ein und dieselbe Basisstation ändern kann.

Als Alternative zu der von Friedl realisierten Adressenvergabe wurden zwei unterschiedliche Varianten diskutiert.

1. Die Programmierung einer speziellen Funkstation zur Adressenvergabe. Diese verwaltet einen Adressenpool und wird in einer abgeschirmten Box mit einer Öffnung für den zu adressierenden Sensorknoten versehen. Der betreffende Knoten wird in der Öffnung in Betrieb genommen, wobei er vorher durch geeignete Maßnahmen (Schalter, Jumper) auf die anstehende Adressierung

vorbereitet wird. Der Knoten empfängt seine Adresse und speichert diese im nicht flüchtigen Flashspeicher für die zukünftige Verwendung ab. **Nachteilig** bei dieser Methode ist die Notwendigkeit einer zusätzlichen Funkstation, die zwar ebenfalls mit dem Chipcon realisiert werden kann, jedoch zur Steuerung und Verwaltung des Adressenpools eine Führung von außen, beispielsweise durch serielle Anbindung an einen PC und passendem Verwaltungsprogramm, benötigt.

2. Eine Adresskodierung mittels programmierbarer I/O's direkt am Funksensorknoten mit Microschaltern oder Jumper. Durch Microschalter oder Jumper wird eine z. B. ein Byte breite Adresse eingestellt. Diese wird durch das Programm eingelesen und bei der weiteren Kommunikation verwendet. **Nachteile** dieser Methode bestehen in der notwendigen zusätzlichen Hardware und in der Beschränkung der Adressbreite, die jedoch mit bis zu 256 Adressen bei der Verwendung von acht Eingängen für dieses Projekt vollkommen ausreicht. Weiters muss durch entsprechende Vorkehrungen sichergestellt werden, dass die Stromaufnahme durch die Schalter entweder sehr gering, oder nur zum Zeitpunkt des Auslesens nennenswert ist. Der **Vorteil** besteht in der einfachen und übersichtlichen Handhabung. Man erkennt auf einen Blick, welche Adresse das Modul besitzt und kann diese bei Bedarf leicht ändern.

Die Wahl fiel auf die zweite Variante, vor allem mit Hinblick auf die leichte Handhabung der Adressvergabe bei der Installation des Funknetzwerkes. Bei der Implementierung musste jedoch die Adressbreite auf sieben Bit beschränkt werden, ein Vollausbau auf acht Bit war aufgrund der Speicherbeschränkung des verwendeten Transceivers CC1010 nicht möglich. Mit den nun verfügbaren 127 verschiedenen Adressen wurde aber dennoch die Aufgabenstellung übertroffen.

Bei Betrachtung der vorliegenden Netzwerktopologie in Abbildung 4-1 ergibt sich damit folgende Konstellation:

Jede Basisstation (Funknetz-Koordinator) erhält eine im vorliegenden Netz eindeutige sieben Bit breite Adresse. Ebenso erhält jeder Sensorknoten eines Unternetzes eine sieben Bit breite Adresse. Damit ergibt sich die Adressierung durch die Angabe des Unternetzes (der Basisstation) und die Adresse des jeweiligen Sensorknotens, wobei die Basisstation die Nummer 0 erhält, also insgesamt eine zwei Byte lange Adresse. Dies entspricht in weiterer Folge der Adressvergabe nach einer erfolgten PaP Anmeldung bei der Arbeit von Friedl, wobei auch die Sonderstellungen der Adressen 254 (stellt eine ungültige Adresse dar) und 255 (adressiert alle Knoten) übernommen wurden.

*Beispiel:* Die verwendete Syntax für Adressen lautet:

[Unternetz-Adresse] / [Knotenadresse]

- |         |  |
|---------|--|
| 1/5     | adressiert Netzwerkknoten #5 des Unternetzes #1                  |
| 1/0     | adressiert die Basisstation des Unternetzes #1                   |
| 0/255   | adressiert sämtliche Netzwerkknoten innerhalb des Unternetzes #0 |
| 255/5   | adressiert sämtliche Netzwerkknoten mit #5 aller Unternetze      |
| 255/255 | adressiert sämtliche Netzwerkknoten aller Unternetze             |

Zum Betrieb eines Funksensorknotens an einer Basisstation ist eine vormalige **Anmeldung** (Assoziation) an dieser notwendig in deren Verlauf die Basisstation die erfolgte Assoziation bestätigt und fortan den Sensorknoten verwaltet. Die Anmeldung wird dabei sofort nach Inbetriebnahme des Sensorknotens gestartet (Abbildung 4-6). War der Knoten schon einmal an eine Basisstation angemeldet, wird als erster Schritt der so genannte „Orphan Scan“ durchgeführt. Orphan bedeutet Waise und bedeutet, dass der Knoten versucht sich unter der alten Konfiguration erneut anzumelden. Ist diese Assoziation in der betreffenden Basisstation noch aktiv, antwortet diese und der Knoten ist erfolgreich wieder angemeldet. Der „Orphan Scan“ umgeht damit die relativ langwierige Anmeldeprozedur und findet etwa Anwendung bei kurzfristigem Ausschalten des Funkknotens oder einer Basisstation. Dies ermöglicht ein erneutes rasches Integrieren des Funkknotens nach einer kurzen Unterbrechung. Existiert keine gültige Assoziation, z. B. bei der Erstanmeldung, verzweigt der Anmeldevorgang zum „Channel Scan“. Dabei wird eine Aufforderung an alle Basisstationen, die sich in der Reichweite des Knotens befinden, gesendet eine Antwort zu senden. Deren Inhalt ist ohne Bedeutung, jedoch ermittelt der Sensorknoten aus der gemessenen Eingangssignalstärke (RSSI - Received Signal Strength Indicator) die Basisstation mit den besten Sende-/Empfangseigenschaften, d.h. den höchsten RSSI-Wert. Im Interesse einer möglichst guten Verbindung im weiteren Betrieb erfolgt die Anmeldung an diesen Koordinator. Die betreffende Adresse der Basisstation wird im nicht flüchtigen Speicher des Chipcon-Transceivers für zukünftige Zugriffe gespeichert.

Eine Abmeldung vom Koordinator ist im beschriebenen Funknetz nicht vorgesehen. Die Sensorknoten sollen so lange wie möglich zuverlässig ihren Dienst tun. Nichts desto trotz wird von der Basisstation nach jeder erfolgreichen Kommunikation die verstrichene Zeit mitprotokolliert. Überschreitet diese eine eingestellte Maximalschwelle wird der Sensorknoten disassoziiert und dies an die Internetdatenbank über das LonWorks weitergemeldet. Gründe für das Ausbleiben einer Kommunikation innerhalb des Zeitfensters stellen auf jeden Fall eine Störung des normalen Betriebes dar, wie z. B. das Zusammenbrechen der Spannungsversorgung oder ähnliches.

Bei Unterbrechung einer aktiven Assoziation, beispielsweise durch außer Betriebnahme der betreffenden Basisstation oder Überschreiten der Funkreichweite des Knotens selber, startet der Sensorknoten sofort mit dem „Channel Scan“, der „Orphan Scan“ wird übersprungen, da als Indikator bereits eine nicht bestätigte Kommunikation mit der alten Basisstation vorliegt. Dieser Vorgang wird als „Roaming“ bezeichnet. Ausgelöst wird er durch mehrfachen unbestätigten Kommunikationsversuch mit der zuvor aktiven Konfiguration.

Das grundlegende Schema der Assoziation entspricht dem von Friedl, die Funktionen wurden jedoch an die unterschiedliche Knotenadressierung angepasst.

Abschließend möchte ich noch ein wenig auf die realisierte Schaltungsvariante zur Adresskodierung eingehen. Wie schon erwähnt wurde die Variante mittels Einlesen von programmierbarer I/O's gewählt. Das Anbringen von „Pull Up“ Widerständen definiert an den Eingängen den logischen High-Pegel. Mittels Microschalter bzw. Jumper wird nun der betreffende Eingang mit dem Spannungsnullpunkt verbunden und stellt damit den logischen Low-Pegel dar. In einer passenden Kombination der Eingänge wird somit eine Adresskodierung vorgenommen. Diese Vorgehensweise ist einfach und kostengünstig herzustellen, hat jedoch den gravierenden Nachteil, dass ein Stromfluss über jeden „Pull Up“ Widerstand eines auf Low geschalteten Adresseinganges stattfindet. Als Abhilfe kann die Spannungsversorgung für den Schaltungsteil der Adresskodierung wiederum über einen programmierbaren I/O vorgenommen werden. Da zum Zeitpunkt der Ent-

wicklung jedoch nur noch wenige freie I/O's verfügbar waren und nicht absehbar war, wie viele noch benötigt werden, wurde zwischen Microschalter bzw. Jumper und dem Spannungsnulldpunkt ein Kondensator zwischengeschaltet. Das somit, bei einer Kodierung des betreffenden Kreises als Low-Pegel, gebildete RC-Glied, verursacht lediglich beim Einschalten der Spannungsversorgung einen nennenswerten Stromfluss. Im Dauerbetrieb reduziert sich dieser auf die unvermeidlichen Leckströme der verwendeten Kondensatoren. Mit den gewählten Werten von 47 kOhm und 3.3  $\mu$ F ergibt sich damit eine Zeitkonstante des RC-Gliedes von etwa 0.155 s. Die Eingangsschwellenspannung des Chipcon des Überganges vom Low- auf den High-Pegel liegt bei 2.31 V [CCDS03]. Das Auslesen der Eingänge zur Adresskodierung muss also nach dem Einschalten der Spannungsversorgung in einer Zeitspanne von etwa 0.19 s stattfinden, was als Zeitfenster vollkommen ausreichend ist. Die Adressinformation wird ausgewertet und im Anschluss im Flash-Speicher abgelegt. Wird eine Änderung benötigt, muss vor einer erneuten Inbetriebnahme lediglich genügend lange gewartet werden, bis die Kondensatoren weitgehend entladen sind damit die neue Konfiguration erkannt werden kann.

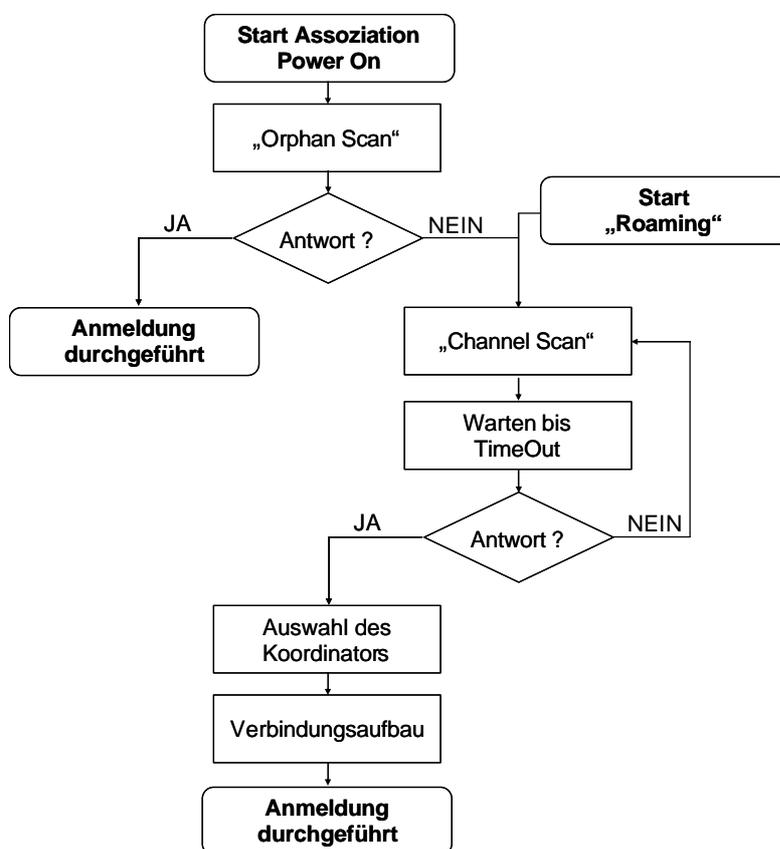


Abbildung 4-6: Flussdiagramm zur Anmeldung

## 4.5 Kommunikationsschnittstellen

In den Kapitel 3.4 und 3.5 wurde bereits auf die Kommunikation zwischen den Systemelementen hingewiesen, einerseits die Kommunikation der Basisstation mit dem

LonWorks-Feldbussystem und andererseits die Datenübertragung zwischen dem Funktransceiver und den ihn steuernden MSP-Chip. Prinzipiell wäre es möglich die komplette Kommunikation über ein System, beispielsweise per SPI, ablaufen zu lassen. Ein Master steuert dabei die Kommunikation multipler Kommunikationspartner, sog. Slaves, auf einem SPI-Bus. Alle verwendeten Halbleiterchips bieten den SPI-Modus an, mit der einen Einschränkung, dass der Chipcon-Chip lediglich als Master eingesetzt werden kann. Da jedoch die Anbindung per Neuron-Chip nur im Fall der Basisstation anzutreffen ist, die Verbindung Chipcon - MSP bei der Basisstation als auch bei den Sensorknoten, wurde auch im Hinblick auf eine Systemtrennung der Weg über zwei verschiedene Kommunikationsschienen gewählt.

#### 4.5.1 SPI

Die SPI-Schnittstelle ermöglicht eine bidirektionale Kommunikation und wird mittels dreier Leitungen realisiert. Zur Steuerung werden jedoch noch zusätzliche Leitungen benötigt, die auf beiden Seiten durch programmierbare I/O's realisiert wurden (Abbildung 4-7). Der grundsätzliche Aufbau wie auch das Schema der zugrunde liegenden Funktionen wurden von Friedl übernommen und können in [FRIE03] nachgelesen werden. An dieser Stelle werden lediglich die unterschiedlichen Rahmenformate, sowie die Implementierung der Funktion zum slaveseitigen Empfang, der bei Friedl nur als Funktionskopf vorhanden war, hervorgehoben.

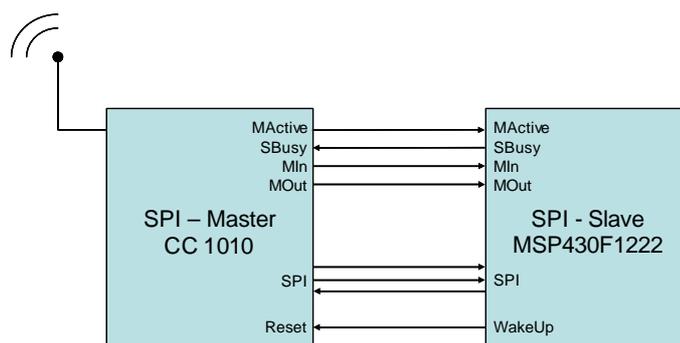


Abbildung 4-7: Schema der Kommunikation per SPI

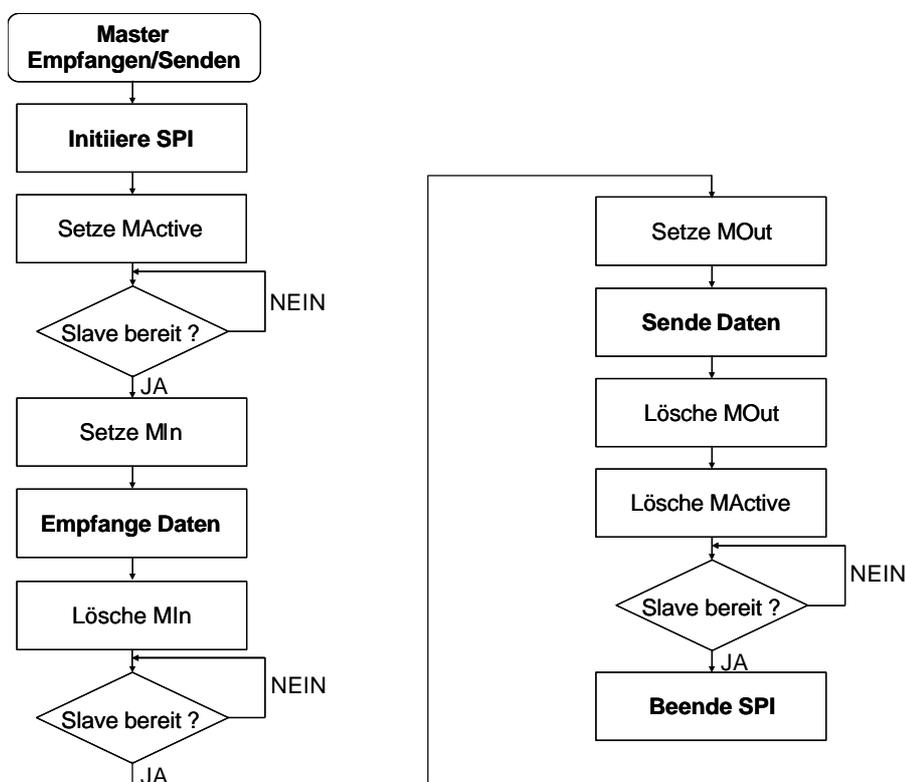
Im Kapitel 3.6 wurde auf die Problematik der Uhrensynchronisation der einzelnen Sensorknoten hingewiesen. Die Steuerung der RTC wird dabei vom MSP-Chip vorgenommen, da zur Einhaltung der Stromsparfunktion der Chipcon-Chip größtenteils im Power-Down-Modus verharrt. Zur einfachen Übertragung der gemessenen Sensorinformationen würde eine unidirektionale Kommunikation vom MSP-Chip zum Chipcon-Chip vollkommen ausreichen, jedoch ist zur Synchronisation der RTC sowie der Übermittlung von Informationen von der Basisstation eine Kommunikation auch in Richtung MSP notwendig.

In Abbildung 4-8 ist der Flussablauf der SPI-Kommunikation zwischen Chipcon (SPI-Master) und MSP (SPI-Slave) aus Sicht des Chipcon dargestellt. Aufgrund der Tatsache, dass beide Chips größtenteils im Power-Down-Modus betrieben werden, ist bei der Aufnahme der Kommunikation eine Initiierung der SPI-Schnittstelle auf beiden Seiten notwendig. Die Synchronisation der Empfangs- bzw. Sendeabläufe wird, wie bereits erwähnt, mittels programmierbarer I/O's vorgenommen, die in Tabelle 4-1 aufgelistet sind.

Bezeichnung	Beschreibung
MActive	Flag zur Anzeige der Bereitschaft zur SPI-Kommunikation des CC1010
SBusy	Flag zur Anzeige der Bereitschaft zur SPI-Kommunikation des MSP430
MOut	Flag zur Ankündigung der Kommunikation vom Master zum Slave
MIn	Flag zur Bereitschaft der Kommunikation vom Slave zum Master

**Tabelle 4-1: I/O - Verbindungen zur SPI-Steuerung**

Den kompletten Ablauf der SPI-Kommunikation seitens des Masters zeigt Abbildung 4-8. Diese Sequenz wird dabei nach der Aktivierung des CC1010 durch den MSP abgearbeitet. Der MSP übermittelt dabei seine anstehenden Sensordaten, die anschließend durch den Chipcon-Transceiver an die Basisstation gesendet werden. Die dazu notwendigen Verarbeitungsschritte sowie die Sicherstellung der Übermittlung sind hier nicht extra ausgeführt, werden jedoch unmittelbar nach dem Schritt „Empfange Daten“ durchgeführt. Als Rückmeldung erhält der übermittelnde Sensorknoten von der Basisstation die aktuelle Uhrzeit und Steuerungsinformationen für den MSP-Chip. Diese werden anschließend beim Schritt „Sende Daten“ übertragen.



**Abbildung 4-8: Flusssteuerung der Master SPI-Kommunikation**

In Abbildung 4-9 ist der Rahmentyp des SPI-Masters abgebildet. Neben den Informationen zur aktuellen Uhrzeit (sec, min, hour) sind hier mit „minTime“ die Zeit zwischen den einzelnen Messzyklen und mit „maxTime“ die Zeitspanne zur Informationsübertragung vorgesehen. Die Größe der Werteschwelle zur Temperaturmessung wird im Feld „delta“ eingestellt. Das Feld „next“ dient zur Synchronisation des Zeitpunktes der Informationsübermittlung des Sensorknotens. Ist der Sensorknoten synchron mit der Basisstation enthält dieses Feld den Wert 0, ansonsten die Differenz zur letzten synchronen Übermittlung. Zusammen mit der Uhrzeit und dem Wert im Feld „maxTime“ errechnet damit der MSP den nächsten Zeitpunkt zur Informationsweiterleitung.

Abbildung 4-10 zeigt schließlich den Rahmentyp des SPI-Slaves. Im Gegensatz zur Arbeit von Friedl wird hier lediglich die Type vier (Var Update) eingesetzt. Das Octet „Frame Type“ könnte entfallen, wurde aufgrund einer Erweiterungsmöglichkeit jedoch belassen. Die Sensorinformationen werden in den Feldern „Temperature 1“ (interner Sensor des MSP) und „Temperature 2“ (Sensor PT1000), die Impulszählerstände in den Feldern „S0 Counter 1“ bis „S0 Counter 3“ eingetragen und haben eine Länge von 16Bit. Das erste Byte des Feldes „Temperature 1“ dient als Vorzeichen für die gemessene Temperatur, die im zweiten Byte enthalten ist. Im ersten Byte des Feldes „Temperature 2“ werden Zehner- und Einerstelle der gemessenen Temperatur übermittelt, ist diese negativ enthält die Hunderterstelle den Wert 1. Die Nachkommastellen werden im zweiten Byte übertragen.



Abbildung 4-9: Rahmentyp SPI-Master



Abbildung 4-10: Rahmentyp SPI-Slave

### 4.5.2 UART

Als Kommunikationsschnittstelle zwischen dem Chipcon CC1010 einer Basisstation und dem Neuron 3150 des LonWorks-Feldbussystems ist eine serielle bidirektionale Verbindung mit einer einstellbaren Übertragungsgeschwindigkeit von bis zu 57.6 kbps vorgesehen. Da die beiden Halbleiter mit unterschiedlichen Versorgungsspannungen betrieben werden, der Neuron Chip wird mit +5 V versorgt, ist die Zwischenschaltung eines Pegelkonverters zum Betrieb einer seriellen Verbindung notwendig. Wie schon im Kapitel 3.4 erläutert kann dieser entweder auf der Platine der Basisstation oder beim Neuron Chip selbst implementiert werden. Beispielsweise bietet die Firma Maxim Integrated Products mit dem Halbleiter MAX3221 einen solchen Pegelkonverter an. Dieser Chip benötigt eine Versorgungsspannung im Bereich von 3 bis 5.5 Volt, hat eine geringe Leerlaufstromaufnahme von 1 µA und übernimmt die Pegelanpassung für einen seriellen, bidirektionalen Kommunikationskanal. Für künftige Erweiterungen kann auch der zweite UART des Chipcon benötigt werden, wobei es im Vorhinein günstiger wäre mit dem Pegelkonverter MAX 3222 zu verfahren, der zwei serielle Kanäle versorgen

kann. In der entwickelten Schaltung, die im Anhang zu finden ist, wird der Vollausbau vorgeschlagen, programmtechnisch wird jedoch lediglich ein Kanal verwendet.

Friedl hat in seiner Arbeit ebenfalls die Kommunikation nach außen per UART vorgesehen, jedoch zur Vermeidung von Übertragungsunterbrechungen durch höher-rangige Interrupts (beispielsweise durch die Funkübertragung) mittels eines zusätzlichen programmierbaren I/O eine Flusssteuerung implementiert. Diese Vorgehensweise ist im vorliegenden Fall nicht möglich, trotzdem wurde die grundlegende Implementierung übernommen. Eingehende Nachrichten lösen ein Interruptereignis aus und werden von der Interruptserviceroutine (ISR) in einer Struktur zwischengespeichert. Ausgehende Nachrichten als Reaktion von Funkinformationen der Sensorknoten, bzw. als Antwort von eingehenden Nachrichten, werden von den entsprechenden Routinen ebenfalls in einer Struktur abgelegt. Die eigentlich Abarbeitung, sowohl der eingehenden als auch der ausgehenden Nachrichten, wird im Hauptprogramm in einer Endlosschleife durchgeführt. Die Namensgebung der dabei verwendeten Routinen wurde von Friedl übernommen, wobei diese jedoch inhaltlich an die fehlende Flusssteuerung angepasst wurden. Die weitere Anwendung kann in [FRIE03] nachgelesen werden. Die verwendeten Rahmentypen und deren Definition sind in Abbildung 4-11 dargestellt.

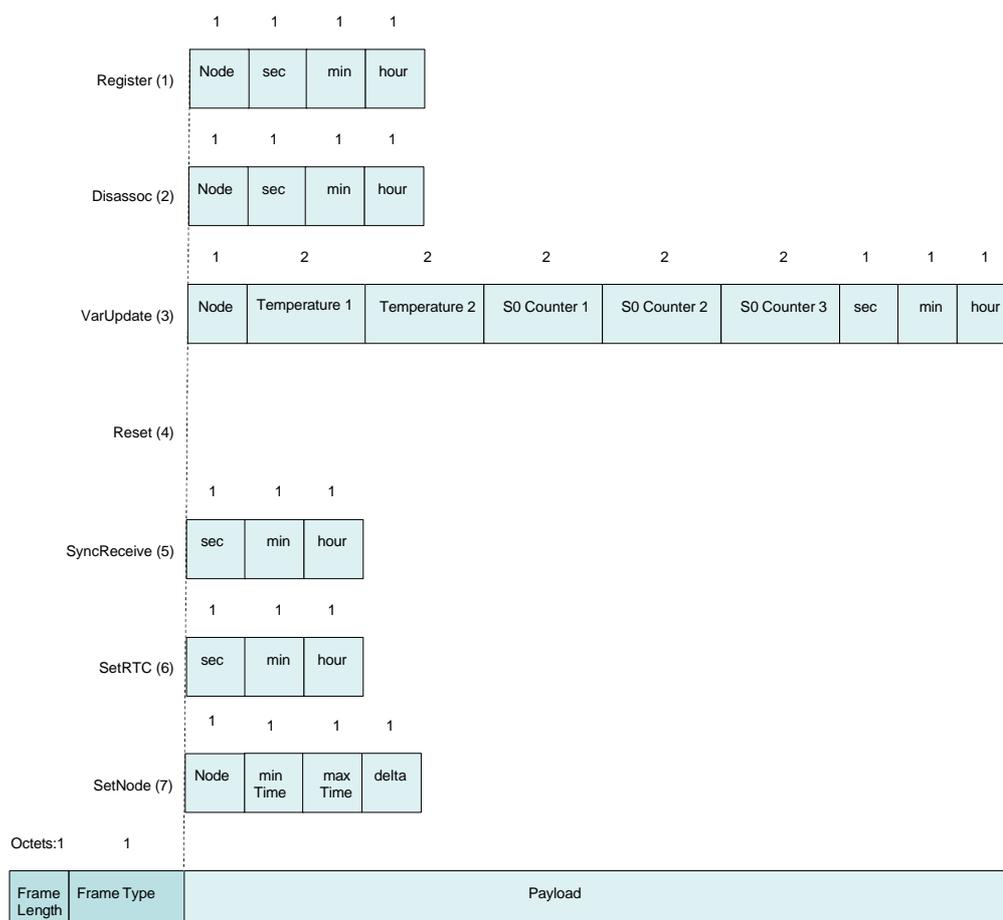


Abbildung 4-11: Rahmentypen für die UART-Kommunikation

## 4.6 Realisiertes Schichtenmodell

In Kapitel 2.1 wurde das OSI-Schichtenmodell zur Beschreibung moderner Kommunikationsnetze vorgestellt. In den darin vorgestellten sieben Schichten erfolgt die Strukturierung der Aufgabenbereiche von Kommunikationsprotokollen. Aufgrund der universellen Einsetzbarkeit des OSI-Modells, ist eine Implementierung aller Schichten im vorliegenden Fall nicht notwendig. Abbildung 4-12 zeigt das realisierte Schichtenmodell nach OSI.

Das „Application Interface“ stellt bei dieser Realisierung die Schnittstelle zwischen Schichtenmodell und Anwendungsprogramm dar. Die gesamte Funktionalität des Funknetzprotokoll ist mit ihrer Hilfe abrufbar. Selbst ist sie Teil des „Application Layer“ und kennzeichnet die oberste Schicht des OSI-Modells. Als Teil der höheren Schichten ist die Schicht „Plug & Play“, die für die automatische An- und Abmeldung verantwortlich zeigt (siehe dazu Kapitel 4.4). Hier wird die bestmögliche Basisstation im Falle eines Sensorknotens ausgewählt und hier erfolgt auch bei einer Basisstation die Dissoziation eines Sensorknotens bei Ausbleiben der erforderlichen Kommunikation. Die Schicht „Power Management“ regelt im Falle des Sensorknotens die Höhe der Sendeleistung für einen gesicherten Kommunikationsbetrieb und trägt damit zur Energieeinsparung bei. Aufgaben der Datensicherung übernimmt die „Medium Access Control“ Schicht, wie z. B. die Datenrahmenbildung, die Bildung von CRC, den Mechanismus der Nachrichtenbestätigung sowie den Ablauf des Mediumzugriffs. Das „Physical Layer“ nimmt schließlich die tatsächliche Übertragung der Information über das Medium Funk wahr. Vorgänge der Datenpufferung, Kodierung und Modulation werden hier ebenso durchgeführt wie auch die Kontrolle der Parameter des Funktransceivers. Die „Management“ Schicht übernimmt die Kontrolle im Fehlerfall und ist für die Initialisierung zuständig.

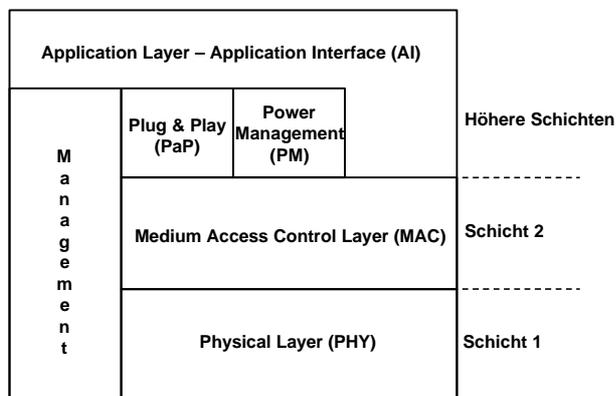


Abbildung 4-12: Realisiertes Schichtenmodell nach OSI

Der geschilderte Schichtenaufbau wurde bereits von Friedl in seiner Arbeit entworfen und wurde aufgrund positiver Erfahrungen in dieser Struktur auch übernommen.

## 4.7 Dienstzugangspunkte

Die Bereitstellung von Diensten einer Schicht des OSI-Referenzmodells erfolgt über Dienstzugangspunkte (Service Access Points, SAP). Verfügbare Dienste werden in Dienstoperationen bzw. Dienstprimitive gegliedert und ergeben sich dabei aus den geforderten Vorgaben. Die realisierten SAP's sind in Abbildung 4-13 ersichtlich.

In diesem Abschnitt wird eine Zuordnung von Diensten und Dienstprimitive zu den Protokollschichten und ihren Schnittstellen vorgenommen. Es besteht die Notwendigkeit dabei zwischen den Diensten, die in einer Basisstation benötigt werden, bzw. den Diensten eines Funksensorknotens zu unterscheiden.

In den folgenden Unterkapiteln wird die Auflistung und Beschreibung der Dienstprimitive für die einzelnen Protokollschichten vorgenommen. Nicht alle Primitives sind dabei in den Protokollen für eine Basisstation (B) bzw. für einen Funkknoten (K) vorgesehen. Die jeweiligen Abkürzungen kennzeichnen in den nachfolgenden Tabellen die Implementierung des Primitives in den entsprechenden Protokollen.

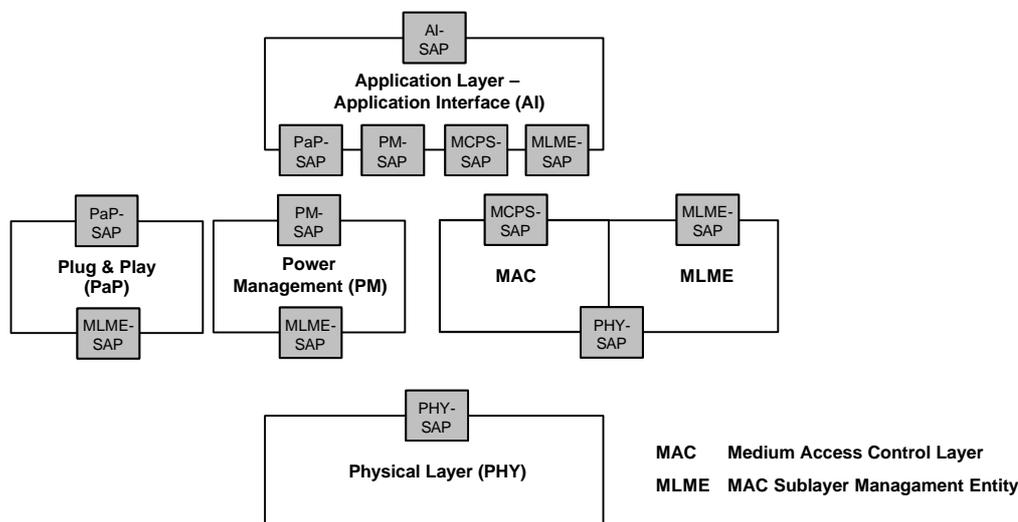


Abbildung 4-13: Dienstzugangspunkte des realisierten Schichtenmodells

### 4.7.1 Application Interface

Das Application Interface (AI) stellt die Schnittstelle des Application Layers und damit des gesamten Funkprotokolls zum übergeordneten Anwenderprogramm dar. Informationen die über die AI ausgetauscht werden, stehen in unmittelbarer Verbindung zu den verwendeten Sensoren, bzw. der RTC, also des Messteiles eines Funkknotens. Die AI erfüllt dabei folgende Aufgaben:

1. Übermittlung von Messwerten von Sensoren
2. Übermittlung von Konfigurationsparametern für Sensoren
3. Abfragen der RTC
4. Übermittlung von Einstellwerten für die RTC

Zur Erfüllung dieser Aufgaben sind AI-Dienstprimitive in der Tabelle 4-2 zusammengestellt und im Anschluss erläutert.

<i>AI-SAP Primitive</i>	<i>Request</i>	<i>Indication</i>	<i>Response</i>	<i>Confirm</i>
AI-INIT	B,K			
AI-RESET	B,K			B,K
AI-VAR-UPDATE	B,K	B		
AI-DISASSOC-NOTIF		B		
AI-REGISTER-RECEIVE		B		
AI-SYNC-RECEIVE		B		
AI-PLUG-AND-PLAY	K			
AI-KEEP-ALIVE	K			

*Tabelle 4-2: AI-SAP Dienstprimitive*

#### **AI-INIT**

**AI-INIT.request(txPowerControl):** Diese Funktion initialisiert den Protokollstapel. Mit dem Parameter wird die Sendeleistung eingestellt, die Basisstation sendet immer mit voller Leistung, der Parameter entfällt daher bei ihr.

#### **AI-RESET**

**AI-RESET.request():** Diese Funktion setzt Parameterwerte auf ihre Ausgangswerte zurück.

**AI-RESET.confirm(Status):** Der Status der Diensterledigung wird hiermit zurückgeliefert.

#### **AI-VAR-UPDATE**

**AI-VAR-UPDATE.request(valueLength, value):** Dieses Dienstprimitive übernimmt die Weiterleitung von gemessenen Sensordaten. Es kann sich dabei um Daten an der Basisstation oder eines Funkknotens handeln. Die Werte werden dabei als Byte-Folgen in der Länge „valueLength“ übergeben und enthalten neben den Sensordaten noch die Adresse des Absenderknotens und die Uhrzeit der Messung.

**AI-VAR-UPDATE.indication(valueLength, value):** Die Information zur Messung von Sensordaten, die von einem Knoten übermittelt wurden, werden mit diesem Dienstprimitive angezeigt. Die als Information übergebene Byte-Folge enthält die Absenderadresse, die Sensordaten und die Uhrzeit der Messung.

#### **AI-DISASSOC-NOTIF**

**AI-DISASSOC-NOTIF.indication(addr):** Dieses Dienstprimitive informiert über eine erfolgte Disassoziation eines Funksensorknotens. Funksensorknoten setzen bei jedem Funkkontakt einen Zähler an der Basisstation zurück. Wird dieser Vorgang nicht

innerhalb einer eingestellten Zeitspanne durchgeführt, erfolgt automatisch eine Disassoziation des Funkknotens von der Basisstation.

#### AI-REGISTER-RECEIVE

**AI-REGISTER-RECEIVE.indication(srcAddr):** Dieses Dienstprimitive informiert über eine erfolgte Assoziation eines Sensorknotens. Die Assoziation erfolgt beim automatischen Plug & Play entweder beim Einschalten des Knotens oder nach Verlust einer herrschenden Verbindung infolge eines Fehlers.

#### AI-SYNC-RECEIVE

**AI-SYNC-RECEIVE.indication(valueLength, value):** Die Basisstation ist für die Detektion eines Synchronimpulses der EVU's vorbereitet. Die Information über den Zeitpunkt des letzten Auftretens eines Synchronimpulses wird von diesem Dienstprimitive angezeigt. Die übermittelten Daten enthalten dabei die Adresse der Basisstation und die detektierte Uhrzeit.

#### AI-PLUG-AND-PLAY

**AI-PLUG-AND-PLAY.request():** Der Anmeldevorgang eines Funkknotens an eine Basisstation wird mit diesem Dienstprimitive durchgeführt. Sämtliche Vorgänge zur Assoziation, die in Kapitel 4.4 bereits beschrieben wurden, werden hier gesteuert.

#### AI-KEEP-ALIVE-SEND

**AI-KEEP-ALIVE-SEND.request(alivePeriode):** Mit Hilfe dieses Primitives stellt ein Funksensorknoten die Zeitdauer ein, innerhalb der er sich an seiner Basisstation melden muss um eine Disassoziation zu verhindern. Der Parameter „alivePeriode“ kennzeichnet dabei die Zeitdauer in Minuten. Jeder aktive Funkkontakt aber auch dieses Dienstprimitive setzen den Zähler an der Basisstation wieder zurück.

### 4.7.2 Plug & Play Layer

Die Aufgaben des Plug & Play Layers bestehen in der Durchführung und Verwaltung von Assoziationsvorgängen im normalen Betrieb, wie auch im Fehlerfall. Die implementierten Dienstprimitive sind in Tabelle 4-3 aufgelistet.

<i>PaP-SAP Primitive</i>	<i>Request</i>	<i>Indication</i>	<i>Response</i>	<i>Confirm</i>
PAP-INIT	B,K			
PAP-RESET	B,K			B,K
PAP-KEEP-ALIVE	B			
PAP-DISASSOC		B		
PAP-GET	B,K			B,K
PAP-SET	B,K			B,K

PAP-START	K			
PAP-ROAMING	K			

*Tabelle 4-3: PaP-SAP Dienstprimitive*

#### **PAP-INIT**

**PAP-INIT.request()**; Dieses Dienstprimitive initialisiert die PaP-Schicht und setzt Variablen auf ihre Startwerte.

#### **PAP-RESET**

**PAP-RESET.request()**: Diese Funktion setzt Parameterwerte auf ihre Ausgangswerte zurück.

**PAP-RESET.confirm(Status)**: Der Status der Diensterledigung wird hiermit zurückgeliefert.

#### **PAP-KEEP-ALIVE**

**PAP-KEEP-ALIVE.request(addr)**: Bei jedem erfolgreichen Funkkontakt eines Funkknotens mit einer Basisstation, wird mit diesem Dienstprimitive der entsprechende Zähler neu gesetzt. Jeder aktive Funkknoten meldet auf solcher Art seine Dienstfähigkeit im Netz. Die Adresse des Knotens wird mit dem Parameter „addr“ angegeben.

#### **PAP-DISASSOC**

**PAP-DISASSOC.indication(addr)**: Erfolgt im Beobachtungszeitraum kein Lebenszeichen eines bis dato angemeldeten Funkknotens, wird mit dieser Funktion die Dissoziation desselben von der Basisstation angezeigt. Der Parameter „addr“ enthält dabei die Adresse des Funkknotens.

#### **PAP-GET**

**PAP-GET.request(addr, PIBAttribute)**: Dieses Dienstprimitive liefert den Inhalt wichtiger Variablen. Der Parameter „addr“ kennzeichnet dabei die Adresse des Funkknotens, „PIBAttribute“ den Namen der gewünschten Variablen. Im Falle eines Funkknotens entfällt der Parameter „addr“.

**PAP-GET.confirm(Status, PIBAttributeValue)**: Diese Funktion meldet den Status des erfolgten Zugriffs auf die selektierte Variable, bei einem erfolgreichen Zugriff enthält „PIBAttributeValue“ schließlich als Zwischenpuffer den Inhalt der selektierten Variablen.

#### **PAP-SET**

**PAP-SET.request(addr, PIBAttribute, PIBAttributeValue)**: Dieses Dienstprimitive ermöglicht den schreibenden Zugriff auf wichtige Variablen der PaP-Protokollschicht. Als Parameter enthält „addr“ die Funkknotenadresse, „PIBAttribute“ den Namen der gewünschten Variablen und „PIBAttributeValue“ deren neuen Inhalt. Im Falle eines Funkknotens entfällt der Parameter „addr“.

**PAP-SET.confirm(Status)**: Diese Funktion meldet den Status der Änderung einer Variablen.

### PAP-START

**PAP-START.request()**: Dieses Dienstprimitive leitet die Assoziation eines Funkknotens ein. Der Anmeldevorgang, wie unter Kapitel 4.4 bereits skizziert, wird damit durchgeführt.

### PAP-ROAMING

**PAP-ROAMING.request()**: Bei Verbindungsfehlern eines Funkknotens zu seiner bis dato assoziierten Basisstation, übernimmt dieses Dienstprimitive den Vorgang zur Auswahl einer neuen Basisstation.

### 4.7.3 Power Management Layer

Das Power Management Layer ermöglicht die Einstellung der Sendeleistung. Der Energieverbrauch eines Transceivers ist direkt mit der Höhe der Sendeleistung korreliert. In vielen Fällen es nicht notwendig mit der vollen verfügbaren Sendeleistung zu kommunizieren, da nicht die volle Reichweite benötigt wird. Dieses Layer ist lediglich Bestandteil des Protokollstapels in einem Funkknoten, eine Basisstation sendet immer mit voller Leistung und erfordert keine derartigen Funktionen. Der eingesetzte Funktransceiver Chipcon CC1010 kann die Qualität eines Empfangssignals messen (RSSI). Damit nun ein Funkknoten beurteilen kann, ob seine Sendefeldstärke für einen einwandfreien Betrieb ausreichend ist, ist die Empfangsstärke seines zuvor gesendeten Datenpakets Bestandteil der Empfangsbestätigung (ACK) der Basisstation. Mit dieser Information kann die Ausgangsleistung für eine gleich bleibende Übertragungsqualität geregelt werden und damit die Batterielebensdauer erhöht werden. Die Tabelle 4-4 enthält die Dienstprimitive der PM-Schicht.

<i>PM-SAP Primitive</i>	<i>Request</i>	<i>Indication</i>	<i>Response</i>	<i>Confirm</i>
PM-INIT	K			
PM-MAX-TX-POWER	K			K
PM-MIN-TX-POWER	K			K

*Tabelle 4-4: PM-SAP Dienstprimitive*

### PM-INIT

**PM-INIT.request(txPowerControl)**: Mit diesem Dienstprimitive wird der Vorgang der oben beschriebenen Sendeleistungsoptimierung initialisiert. Der Parameter „txPowerControl“ ermöglicht ein Ein- bzw. Ausschaltung der Optimierung.

### PM-MAX-TX-POWER

**PM-MAX-TX-POWER.request()**: Diese Dienstprimitive aktiviert die maximale Sendeleistung des Funktransceivers. Vor allem bei den Vorgängen der Assoziation ist dies notwendig.

**PM-MAX-TX-POWER.confirm(Status)**: Der Status der Leistungseinstellung wird mit diesem Primitive angezeigt.

### PM-MIN-TX-POWER

**PM-MIN-TX-POWER.request():** Das Dienstprimitive nimmt die Einstellung der minimalen Sendeleistung am Transceiver vor.

**PM-MIN-TX-POWER.indication(Status):** Der Status der Leistungseinstellung wird signalisiert.

#### 4.7.4 Medium Access Control Layer

Der Medium Access Control Layer übernimmt die Generierung der Daten- und Bestätigungsrahmen und bildet damit eine Schnittstelle zwischen den höheren Schichten und der Physikalischen Bitübertragungsschicht. Gegliedert ist sie in eine Managementeinheit, die MAC Sublayer Management Entity (MLME), die den Aufruf von Management-Funktionen erlaubt, sowie ein MAC Common Part Sublayer (MCPS), das den Transport von Datenrahmen der höheren Schichten übernimmt (siehe dazu Abbildung 4-13). Die Sublayer können über zwei unterschiedliche SAP's erreicht werden. Die Dienstprimitive der MAC-Schichte sind in Tabelle 4-5 aufgelistet.

<i>MLME/MCPS-SAP Primitive</i>	<i>Request</i>	<i>Indication</i>	<i>Response</i>	<i>Confirm</i>
MLME-INIT	B,K			
MLME-RESET-PIB	B,K			B,K
MCPS-DATA-SEND	B,K			B,K
MCPS-DATA-RECEIVE		B,K		
MLME-ASSOC	K	B	B	K
MLME-SCAN-SEND	K			K
MLME-GET	B,K			B,K
MLME-SET	B,K			B,K
MLME-GET-COORD-RSSI		K		
MLME-CHANGE-OUTPUT-POWER	K			K
MLME-ORPHAN-RECEIVE		B	B	
MLME-RX-ENABLE	B			

*Tabelle 4-5: MLME/MCPS-SAP Dienstprimitive*

#### MLME-INIT

**MLME-INIT.request():** Diese Funktion initialisiert die Variablen des MAC-Layers. Hier wird auch das Einlesen der Ports zur Adressenbestimmung durchgeführt (siehe dazu Kapitel 4.4) und die ermittelte Adresse gespeichert.

#### MLME-RESET-PIB

**MLME-RESET-PIB.request():** Das Rücksetzen von Parametern und Variablen des MAC-Sublayers wird von diesem Dienstprimitive durchgeführt.

**MLME-RESET-PIB.confirm(Status):** Der Status der Dienstdurchführung wird mit dieser Funktion angezeigt.

#### MCPS-DATA-SEND

**MCPS-DATA-SEND.request(srcPID, srcAddr, dstPID, dstAddr, msduLength, msdu, txOptions):** Dieses Dienstprimitive übernimmt die Verpackung und Weiterleitung von Daten aus höheren Schichten. Der Parameter „srcPID“ kennzeichnet dabei die Nummer des eigenen Unternetzes, „srcAddr“ die eigene Knotenadresse, „dstPID“ die Nummer des Empfängerunternetzes, „dstAddr“ die Knotenadresse des Empfängers, „msduLength“ die Länge des aus höheren Schichten übernommenen Datenpakets, „msdu“ das Datenpaket. Der Parameter „txOptions“ wurde aus Kompatibilität zum ZigBee-Standard eingeführt, hat hier aber keine Auswirkung.

**MCPS-DATA-SEND.confirm(Status):** Diese Funktion gibt Information über eine erfolgreiche oder fehlerhafte Datenübertragung

#### MCPS-DATA-RECEIVE

**MCPS-DATA-RECEIVE.indication(srcPID, srcAddr, dstPID, dstAddr, msduLength, msdu, mpduLinkQuality):** Dieses Dienstprimitive zeigt den Empfang eines Datenrahmens an und übernimmt die Weiterleitung an höhere Schichten. Die Parameter „srcPID“ und „srcAddr“ kennzeichnen das Absenderunternetz und die Absenderknotenadresse, „dstPID“ und „dstAddr“ sind die Nummer des Empfängerunternetzes und der Empfängerknotenadresse, „msduLength“ die Länge und „msdu“ der Inhalt des empfangenen Datenpaketes und schließlich enthält „mpduLinkQuality“ die Empfangsqualität in der Einheit dBm, die bei der letzten Kommunikation vom Kommunikationspartner ermittelt und übersendet wurde.

#### MLME-ASSOC

**MLME-ASSOC.request(pid, powerSource, assocTimeoutPeriode, assocDeviceAddress):** Mit diesem Dienstprimitive kann sich ein Knoten an eine Basisstation anmelden. Die Parameter „pid“ und „assocDeviceAddress“ kennzeichnen dabei die Nummer des Unternetzes und die Adresse der betreffenden Basisstation. Die Parameter „powerSource“ und „assocDeviceAddress“ sind lediglich aus Kompatibilitätsgründen implementiert und haben hier keine Bedeutung.

**MLME-ASSOC.confirm(assocStatus):** Dieses Primitive signalisiert den Status der Anmeldung an eine Basisstation.

**MLME-ASSOC.indication(deviceAddr, PowerSource, assocTimeoutPeriode):** Dieses Dienstprimitive zeigt einer Basisstation einen Anmeldeversuch eines Funkknotens an. Der Parameter „deviceAddr“ enthält dabei die Funkknotenadresse, „PowerSource“ und „assocTimeoutPeriode“ haben in dieser Implementierung keine Bedeutung und sind lediglich aus Kompatibilität enthalten.

**MLME-ASSOC.response(assocStatus):** Der anfragende Funkknoten wird mit diesem Dienstprimitive über den Status seines Anmeldeversuches informiert.

#### MLME-SCAN-SEND

**MLME-SCAN-SEND.request(scanType, scanDuration):** Dieses Dienstprimitive übernimmt in Abhängigkeit des Parameters „scanType“ entweder einen „Orphan Scan“ oder einen „Channel Scan“ (siehe dazu das Kapitel 4.4). Der „Orphan Scan“ wird dabei

von einem verwaisten Funkknoten veranlasst, der den Kontakt zu seiner Basisstation durch Verbindungsfehler verloren hat. Bei keiner aktiven Verbindung wird der „Channel Scan“ durchgeführt, wobei alle in Reichweite befindlichen Basisstationen aufgefordert werden, sich innerhalb der Zeitspanne „scanDuration“, zu melden.

**MLME-SCAN-SEND.confirm(CoordCount, energyDetectList, PANDescriptorSet):**

Als Rückmeldung eines „Orphan Scan“ enthält der Parameter „CoordCount“ den Wert 1, im Falle eines „Channel Scan“ die Anzahl der Basisstationen, die geantwortet hat. Die Liste „PANDescriptorSet“ enthält die Netzwerkadressen und RSSI-Werte beim jeweiligen Empfang der Antworten. Diese Informationen werden nun zur Auswahl derjenigen Basisstation verwendet, die die beste Empfangseigenschaften aufweist. Der Parameter „energyDetectList“ ist aus Gründen der Kompatibilität zu ZigBee implementiert, hat jedoch hier keine Bedeutung.

### MLME-GET

**MLME-GET.request(PIBAttribute):** Dieses Dienstprimitive ermöglicht den lesenden Zugriff auf die Variable, die mit dem Parameter „PIBAttribute“ angegeben wird.

**MLME-GET.confirm(Status, PIBAttributeValue):** Diese Funktion meldet den Status des erfolgten Zugriffs auf die selektierte Variable, bei einem erfolgreichen Zugriff enthält „PIBAttributeValue“ schließlich als Zwischenpuffer den Inhalt der selektierten Variablen.

### MLME-SET

**MLME-SET.request(PIBAttribute, PIBAttributeValue):** Dieses Dienstprimitive ermöglicht den schreibenden Zugriff auf Variablen des MAC-Layers. Als Parameter enthält „PIBAttribute“ den Namen der gewünschten Variablen und „PIBAttributeValue“ deren neuen Wert.

**MLME-SET.confirm(Status):** Diese Funktion informiert über den Status der Variablenänderung.

### MLME-GET-COORD-RSSI

**MLME-GET-COORD-RSSI.indication(rssi):** Jeder Bestätigungsrahmen enthält die Größe der Empfangsfeldstärke ihrer vorangehenden Nachricht. Dieses Dienstprimitive extrahiert diesen Wert und übergibt ihn im Parameter „rssi“. Mit Hilfe des RSSI-Wertes lässt sich die Qualität der Verbindung überprüfen und als Parameter zur Energieeinsparung nutzen.

### MLME-CHANGE-OUTPUT-POWER

**MLME-CHANGE-OUTPUT-POWER.request(delta):** Dieses Primitive ermöglicht die Einstellung der Sendeleistung. Der Parameter „delta“ kennzeichnet dabei den Wert, um den die Sendeleistung geändert werden soll.

**MLME-CHANGE-OUTPUT-POWER.confirm(Status):** Der Status zur Änderung der Sendeleistung wird mit dieser Funktion signalisiert.

### MLME-ORPHAN-RECEIVE

**MLME-ORPHAN-RECEIVE.indication(orphanAddress):** Die nächsthöhere Schicht wird über das Eintreffen einer Aufforderung zum „Orphan Scan“ informiert. Ein „Orphan Scan“ wird von einem Funkknoten zum Wiederaufbau einer Assoziation, die in Folge eines Verbindungsfehlers verloren gegangen ist, initiiert.

**MLME-ORPHAN-RECEIVE.response(OrphanStatus, allocatedAddress):** Dieses Dienstprimitive übersendet die Antwort auf den initiiierenden Funkknoten über den Status der Anmeldung. Der Parameter „OrphanStatus“ enthält dabei einen logischen Wert über den Zustand der Assoziation, „allocatedAddress“ enthält die Adresse des anfragenden Funkknotens.

#### MLME-RX-ENABLE

**MLME-RX-ENABLE.request(deferTime, rxState):** Dieses Dienstprimitive steuert je nach dem Inhalt des Parameters „rxState“ den Funktransceiver. Der Parameter „deferTime“ ist lediglich aus Kompatibilität zu ZigBee enthalten und hat hier keine Auswirkung.

### 4.7.5 Physical Layer

Das Physical Layer verwaltet den Zugriff auf das physikalische Übertragungsmedium und ist damit für den bidirektionalen Transport des Datenrahmens der MAC-Schicht verantwortlich. Die Dienstprimitive sind in Tabelle 4-6 angeführt.

<i>PHY-SAP Primitive</i>	<i>Request</i>	<i>Indication</i>	<i>Response</i>	<i>Confirm</i>
PHY-INIT	B,K			
PHY-RESET-PIB	K			K
PHY-DATA-SEND	B,K			
PHY-DATA-RECEIVE		B		
PHY-DATA-POLL	K			K
PHY-RX-ENABLE	B			
PHY-ENERGY-DETECT	B,K			B,K
PHY-GET	K			K
PHY-SET	K			K

*Tabelle 4-6: PHY-SAP Dienstprimitive*

#### PHY-INIT

**PHY-INIT.request():** Das Dienstprimitive initialisiert die Physikalische Schicht und ihre Variablen. Insbesondere werden die Parameter des Transceivers eingestellt.

#### PHY-RESET-PIB

**PHY-RESET-PIB.request():** Dieses Dienstprimitive setzt die Variablen der Physikalischen Schicht auf ihre Initialwerte zurück. Dies betrifft insbesondere die Einstellungen zur Sendeleistung des Transceivers.

**PHY-RESET-PIB.confirm(Status):** Informiert über den Status der Diensterledigung.

### PHY-DATA-SEND

**PHY-DATA-SEND.request(psduLength, psdu):** Dieses Dienstprimitive übernimmt die Übertragung eines Datenrahmens aus der nächst höher gelegenen MAC-Schicht über das Medium Funk. Mit dem Parameter „psduLength“ wird die Länge des Datenrahmens, deren Inhalt in „psdu“ übergeben.

### PHY-DATA-RECEIVE

**PHY-DATA-RECEIVE.indication(psduLength, psdu, LinkQuality):** Empfangene Datenrahmen werden an die MAC-Schicht zur Weiterverarbeitung übergeben. Der Parameter „psduLength“ ist dabei die Länge der empfangenen Nachricht, „psdu“ deren Inhalt und „LinkQuality“ enthält die empfangene Feldstärke bei der Übertragung.

### PHY-DATA-POLL

**PHY-DATA-POLL.request(timeout):** Der Funktransceiver wird mit diesem Dienstprimitive auf Empfang geschaltet und verbleibt auf Empfang für die Dauer einer Zeitspanne, die im Parameter „timeout“ vorgesehen ist.

**PHY-DATA-POLL.confirm(psduLength, psdu, ppduLinkQuality):** Die MAC-Schicht wird über einen etwaigen Nachrichteneingang informiert. Der Parameter „psduLength“ enthält die Länge der eingegangenen Nachricht, „psdu“ deren Inhalt, in „ppduLinkQuality“ wird die Empfangsqualität übergeben. Wurde im Beobachtungszeitraum „timeout“ kein Eingang einer Nachricht verzeichnet, wird in „psduLength“ der Wert 0 übergeben.

### PHY-RX-ENABLE

**PHY-RX-ENABLE.request(rxState):** Dieses Dienstprimitive steuert den Zustand des Funktransceivers je nach dem Parameter „rxState“ und ermöglicht so den Wechsel vom Empfangs- in den Sendemodus.

### PHY-ENERGY-DETECT

**PHY-ENERGY-DETECT.request():** Mit diesem Dienstprimitive kann nach Eintreffen einer Nachricht, die Ermittlung der Empfangsfeldstärke durchgeführt werden.

**PHY-ENERGY-DETECT.confirm(rssi):** Das Ergebnis der Feldstärkemessung wird im Parameter „rssi“ übergeben.

### PHY-GET

**PHY-GET.request(PIBAttribute):** Mit Hilfe dieses Primitive kann der Zustand von Variablen, übergeben in „PIBAttribute“, des Physical Layer gelesen werden.

**PHY-GET.confirm(Status, PIBAttributeValue):** Der Status über den Lesevorgang wird rückübermittelt. Bei einem erfolgreichen Zugriff enthält „PIBAttributeValue“ den Inhalt der gewünschten Variablen.

### PHY-SET

**PHY-SET.request(PIBAttribute, PIBAttributeValue):** Dieses Dienstprimitive ermöglicht den schreibenden Zugriff auf Variablen des Physical-Layer. Als Parameter enthält „PIBAttribute“ den Namen der gewünschten Variablen und „PIBAttributeValue“ deren neuen Wert.

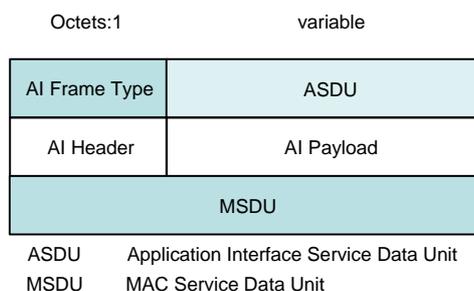
**PHY-SET.confirm(Status):** Diese Funktion informiert über den Status der Variablenänderung.

## 4.8 Rahmenformate

Das OSI-Referenzmodell definiert den Protokollschichtenaufbau und auch den Mechanismus des Datentransports bzw. des Zugriffs auf Dienste einer Schicht. Das Schema der Dienste und Dienstoperationen wurde bereits in Kapitel 4.6 ausführlich erläutert. In diesem Kapitel werden die Rahmenformate definiert, die zum Datentransport bzw. zur Kommunikation zwischen den einzelnen Instanzen Verwendung finden.

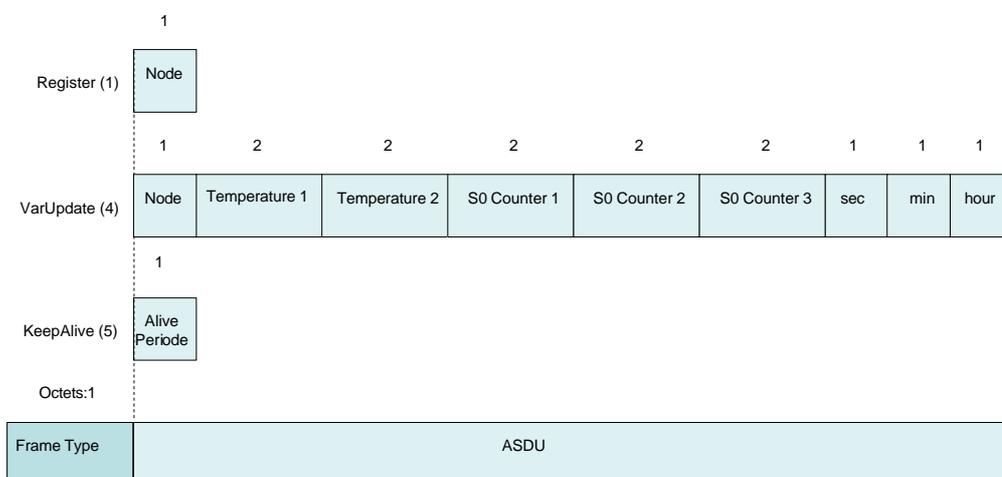
### 4.8.1 Höhere Schichten

Der allgemeine Rahmenaufbau des Application Interface AI (Application Interface Protocol Data Unit, APDU) ist in Abbildung 4-14 dargestellt. Als Protocol Control Information PCI findet hier lediglich die Information über die Rahmentype Verwendung, was vollkommen zur Abwicklung ausreichend ist.



**Abbildung 4-14: Allgemeines Rahmenformat des AI (APDU)**

Die verschiedenen möglichen Rahmentypen mit einer genauen Beschreibung der SDU sind in ersichtlich.



**Abbildung 4-15: Rahmentypen der APDU**

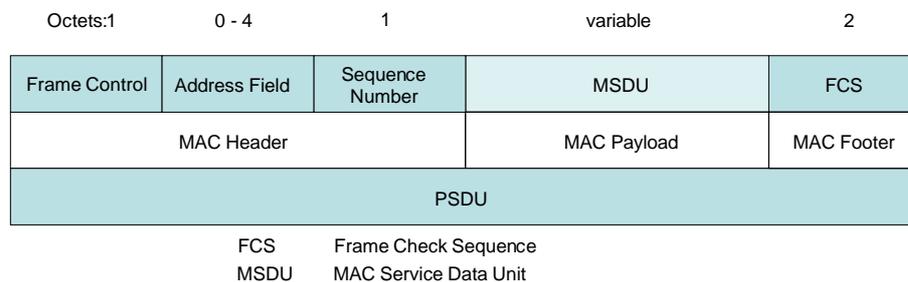
### 4.8.2 Schicht 2

Das Rahmenformat der Schicht 2, des MAC-Layer, ist in drei Blöcke eingeteilt (Abbildung 4-16):

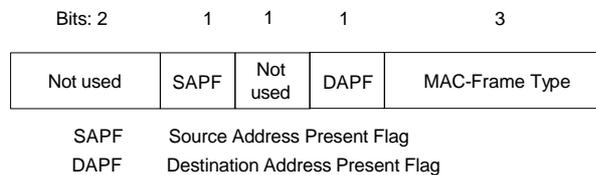
1. MAC-Header      Der Header enthält die Rahmenkontrollinformation, Ziel-, Absenderadressen und die Sequence Number.
2. MSDU            Der zweite Abschnitt, die MAC-Service Data Unit, ist in ihrer Länge variabel und trägt die eigentliche Information.
3. MAC-Footer     Den Abschluss bildet die 16 Bit breite CRC-Kontrollsumme.

Das erste Byte des MAC Header trägt die Rahmenkontrollinformation. Diese definiert den Rahmentyp und gibt Aufschluss über die Anzahl und die Art von Adressangaben (Abbildung 4-17). Sind die Bits SAPF und DAPF gesetzt, enthält das „Address Field“ die Absender- sowie die Zieladresse im Format [Unternetz-Adresse] / [Knotenadresse] (siehe dazu Kapitel 4.4). Der Rahmentyp wird durch drei Bit des Feldes „MAC-Frame Type“ definiert, möglich sind folgende Typen:

- 001      DATA            Datenrahmen
- 010      ACK                    Bestätigungsrahmen
- 011      COMMAND            Kommandorahmen

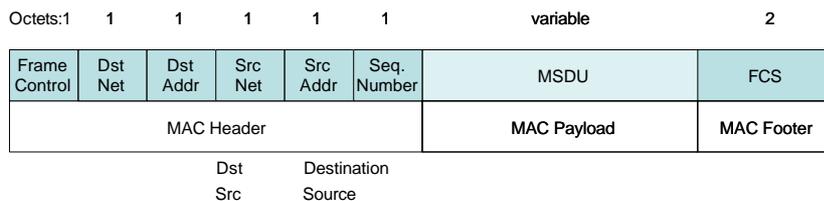


**Abbildung 4-16: Rahmenformat des MAC-Layer (MPDU)**



**Abbildung 4-17: MAC-Frame Control**

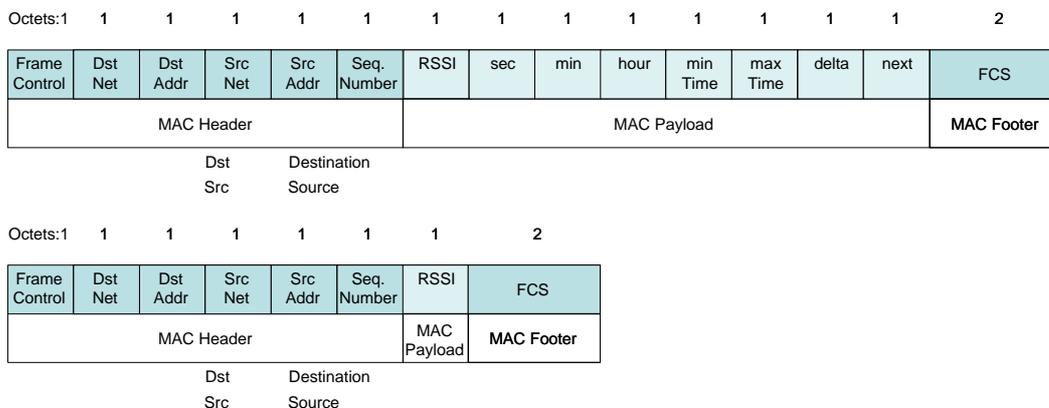
Der MAC-Datenrahmen (DATA) wird zum Transport von Daten verwendet. Die angewendete Form ist in Abbildung 4-18 dargestellt und enthält sowohl Quell- als auch Zieladresse.



**Abbildung 4-18: Rahmenformat des DATA-Typs**

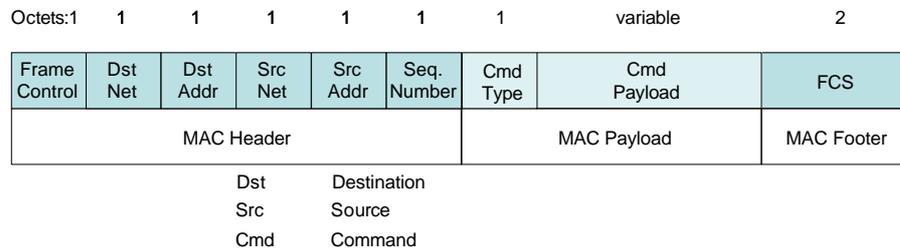
Der genaue Aufbau des MAC-Bestätigungsrahmens ist aus Abbildung 4-19 ersichtlich. Bereits im Kapitel 4.3 wurde auf die Notwendigkeit einer Adressangabe im Bestätigungsrahmen hingewiesen, weiters wurde auch die Problematik der Uhrensynchronisation im Kapitel 3.6 erläutert. Daraus resultieren einerseits die unterschiedlichen Rahmenformate zwischen Basisstation und Sensorknoten, wie auch der etwas größere Overhead des ACK-Rahmens einer Basisstation. Beiden Rahmentypen ist die Implementierung der RSSI-Information gemein, die die gemessene Empfangsfeldstärke der vorhergehenden Nachricht enthält. Damit kann ein Sensorknoten die notwendige Anpassung seiner Sendeleistung einstellen und zur Energieeinsparung beitragen. Die zusätzlichen Felder des ACK-Rahmens einer Basisstation enthalten nachstehende Information, die genaue Funktion der Felder wurde in Kapitel 4.5.1 erklärt:

- sec die Sekundenangabe zum Zeitpunkt des Sendens
- min die Minutenangabe zum Zeitpunkt des Sendens
- hour die Stundenangabe zum Zeitpunkt des Sendens
- minTime minimale Zeitspanne zwischen den einzelnen Messvorgängen des Sensorknotens
- maxTime Zeitspanne zur Informationsübertragung der gemessenen Werte
- delta Wertschwelle zur Temperaturmessung
- next Synchronisationsinformation zur Informationsübertragung



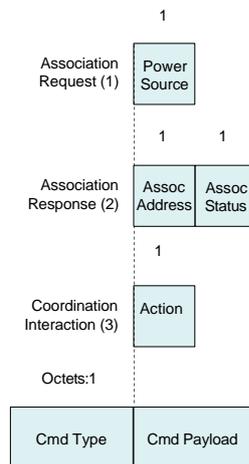
**Abbildung 4-19: ACK-Rahmentypen: oberes Teilbild ACK-Rahmen einer Basisstation; unteres Teilbild ACK-Rahmen eines Sensorknotens**

Den Aufbau des MAC-COMMAND Rahmentyps zeigt die Abbildung 4-20. Die Anwendung dieses Rahmentyps ist auf Assoziationsvorgänge beschränkt (siehe dazu Kapitel 4.4).



**Abbildung 4-20: COMMAND-Rahmentyp**

Abbildung 4-21 zeigt die unterschiedlichen Typen des COMMAND-Rahmentyps.



**Abbildung 4-21: Aufbau der MAC-Payload des COMMAND-Rahmentyps**

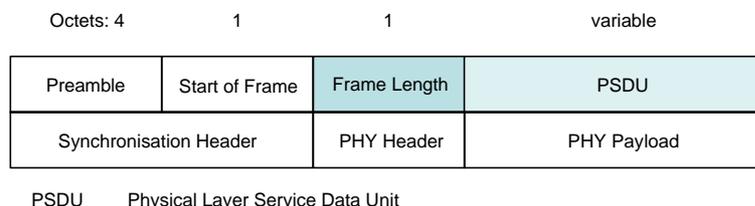
Die Kommandotypen „Coordination Interaction“ kann dabei folgende Aktionen beinhalten:

- 0x00      Active Scan Request
- 0x01      Active Scan Response
- 0x02      Orphan Scan Request
- 0x03      Orphan Scan Response

### 4.8.3 Schicht 1

Mit dem Datenrahmen der physikalischen Schicht wird die Übertragung über das Medium Funk vorgenommen. Neben der Information über die Länge der Nutzdaten und den Nutzdaten selber, enthält der Datenrahmen noch zusätzliche Information, die eine Bitsyn-

chronisation beim Empfänger erleichtern und den Beginn der Nutzinformation anzeigen. Die Bitsynchronisation wird mit der so genannten Preamble ermöglicht, das „Start of Frame“-Byte leitet die eigentliche Datenübertragung ein. Der Aufbau des Rahmens ist in Abbildung 4-22 dargestellt.



**Abbildung 4-22: Rahmenformat des PHY-Layer (PPDU)**

## 4.9 Entwicklungsumgebung

Jede Station des Funknetzwerkes, sei es eine Basisstation oder Sensorknoten, wird aus einem Funkkommunikationsteil und einem ihn steuernden Messteil gebildet. Zentraler Halbleiterbaustein des Funkteiles ist dabei der CC1010 der Firma Chipcon, während der Messteil mit dem MSP430F1222 der Firma Texas Instruments gebildet wird. Beiden Halbleitern ist gemein, dass sie, um die gewünschte Funktionalität zu erbringen, mit einem Anwenderprogramm versehen werden müssen. Dieses wird üblicherweise auf einem normalen PC verfasst und mit geeigneten Hilfsmitteln in den nicht flüchtigen Programmspeicher der entsprechenden Halbleiter geschrieben.

Die unterschiedlichen Module um die Halbleiter und deren Entwicklungsumgebungen, sowie Test- und Verifiziermöglichkeiten werden in diesem Kapitel vorgestellt. Auf Schwächen und Stärken in Bezug auf die praktische Handhabung während der Entwicklung wird hingewiesen.

### 4.9.1 Sendemodul

Das zentrale Bauteil des Funkteiles des Netzwerkes wird mit dem CC1010 der Firma Chipcon gebildet. Dieser Halbleiter beinhaltet einen Funktransceiver und einen Mikrocontroller auf einem Chip. Als zusätzliche wichtige Features wären noch zwei serielle Schnittstellen, 26 programmierbare I/O's, vier programmierbare Timer und eine RTC zu nennen. Die Liste aller Eigenschaften kann in [CCDS03] nachgelesen werden.

Zur Entwicklung eigener Anwendungen bietet die Firma Chipcon ein „Development Kit“, bestehend aus einem Entwicklungsboard und zwei Evaluations Modulen, an (Abbildung 4-23). Weiters beinhaltet das Kit eine schraubbare 1/4-Antenne und eine Software-CD. Die Evaluations Module sind dabei in ihren externen Bauteilen für einen gewählten Frequenzbereich vorkonfiguriert (siehe dazu Kapitel 3.2). Darauf sind alle Anschlüsse des CC1010 auf zwei Steckleisten ausgeführt, damit lässt sich ein Modul mit dem Evaluierungsboard verbinden. Ein fertig programmiertes Modul kann auch ohne Evaluierungsboard betrieben werden. Es benötigt dazu lediglich eine Spannungsversorgung im Bereich von 2,7 - 3,6 V. Das untere Teilbild von Abbildung 4-23 zeigt das Evaluierungsboard mit einem aufgestecktem Modul.

Alle digitalen programmierbaren I/O's, sowie die Eingänge zum ADC sind mit Connectoren am Board ausgeführt. Am Board gibt es noch vier frei einsetzbare Schalter und vier verschieden farbige LED's, beide Gruppen sind an programmierbaren I/O's gebunden. Die Spannungsversorgung kann im Bereich von 4 - 10 V variieren und wird am Board geregelt. Beide UART-Anschlüsse des Chipcon CC1010 sind über Pegelwandler zu standardisierten seriellen Anschlüssen ausgeführt. Die Programmierung des CC1010 wird über einen parallelen Anschluss in Verbindung mit einem PC durchgeführt. Weiters sind auch die Anschlüsse des SPI noch extra ausgeführt, was eine Programmierung eigener Schaltungen, die nicht wie das Evaluation Module an das Board gesockelt werden können, ermöglicht. Leider fehlten bei dem verfügbaren Development Kit das parallele und die zwei seriellen Anschlusskabel, sowie das Netzteil für die Spannungsversorgung. Die Kabel wurden anhand von Anschlussschemata nachgebaut, bzw. nachgekauft, als Spannungsversorgung wurde ein handelsübliches, einstellbares Steckernetzteil eingesetzt.

Auf der Software-CD befinden sich neben den Dokumentationen zum CC1010 und dem Development Kit noch die Programme „Smart RF Studio“, „Chipcon Flash Programmer“ sowie „Keil uVision2 C51 Evaluation Kit“. Da auf der Homepage der Firma neuere Versionen der Programme verfügbar waren, wurde diese eingesetzt.

Das Programm „Chipcon Flash Programmer“ ermöglicht die Übermittlung und damit die Programmierung eines fertig compilierten Anwenderprogrammes über die parallele Verbindung an das Development Kit.

„Smart RF Studio“ stellt ein Hilfsprogramm zur Berechnung von Parameterwerten des Funktransceivers dar. Es liefert für eine gewünschte Übertragungsfrequenz, Datenrate, Art der Kodierung, usw. eine C-Struktur, die leicht in eigene Anwenderprogramme implementiert werden kann und somit die RegisterEinstellung erheblich vereinfacht.

Als Programmierumgebung wurde schließlich „Keil uVision2 C51 Evaluation Kit“ eingesetzt. Sämtliche notwendigen Konfigurationen und Informationsdateien für einen Einsatz dieser Software zur Programmierung des CC1010 Mikrocontrollers werden von Chipcon zur Verfügung gestellt. Die Programmierung selbst erfolgt in der Sprache C. Die Compilierung und auch das Übertragen des fertigen Programmes auf das Development Kit kann über die Keil Programmierumgebung durchgeführt bzw. gesteuert werden.

Mit der Software Bibliothek HAL (Hardware Abstraction Layer) stellt Chipcon eine Fülle von C-Funktionen und Makros zur Verfügung, die die Anwendung hardwarenaher Funktionen des CC1010 vereinfachen. RegisterEinstellungen des Funktransceivers, der Timer, der UART, der programmierbaren I/O's, usw. lassen sich damit übersichtlich steuern, bzw. diese Komponenten einsetzen.

Zur Fehlersuche bzw. zum Debugging kann über Keil uVision ein „Debug Bootloader“ auf den Chipcon geladen werden. Die Kommunikation beim Debuggen zwischen Programmierumgebung und Evaluation Modul wird dabei über eine der beiden seriellen Verbindungen durchgeführt. Damit ist ein online-debuggen möglich, dass bei umfangreicheren Anwenderprogrammen allerdings bald an seine Grenzen stößt. Wesentlich einfacher und auch bei komplizierteren Programmen einsetzbar, ist zur Programmverifikation der Einsatz eines Terminalprogrammes am PC, wobei die entsprechende Verbindung zum CC1010 ebenfalls über einen UART vorgenommen wird. Damit können an geeigneter Stelle Konsolenausgaben durchgeführt werden, was sich als sehr hilfreich bei der Fehlersuche erwiesen hat. Bei der Programmierung konnte jedoch immer nur ein Systemteil, also entweder ein Sensorknoten oder eine Basisstation, mittels Development Kit mit der Konsolenausgabe überprüft werden. Vor allem bei der Verifikation der

Funktionen zur gegenseitigen Kommunikation mussten die entsprechenden Module oft umgesteckt werden.

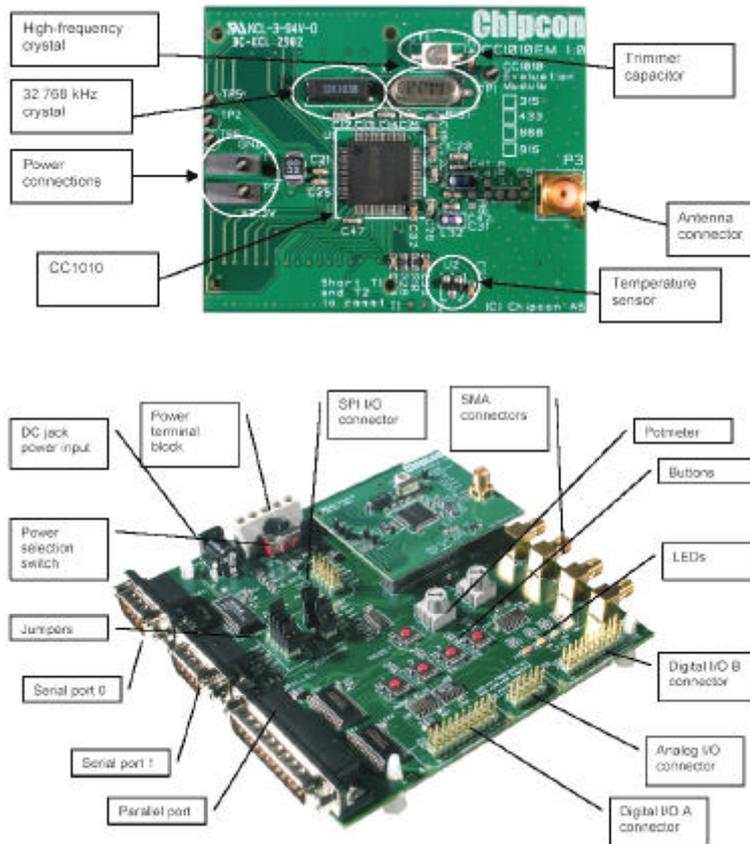


Abbildung 4-23: Evaluations Modul und Entwicklungsboard des CC1010 [CCDK03]

Neben den zwei Evaluation Modulen der Firma Chipcon standen noch vier, im Zuge eines Praktikums an der TU-Wien entwickelte, Module zur Verfügung (Abbildung 4-24).



Abbildung 4-24: Funkmodul

Im Aufbau wurden sie an die Referenzvorgaben zur Verwendung des CC1010 von Chipcon angelehnt, haben jedoch eine direkt am PCB gedruckte Antenne. Diese hat, aufgrund eines Produktionsfehlers im PCB, jedoch nur eine geringe Reichweite und

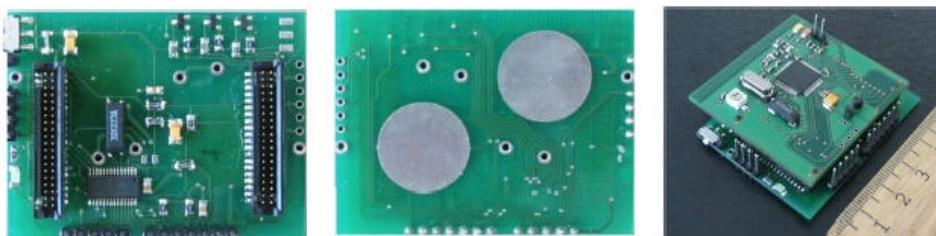
wurde bei allen Modulen durch eine Litzenleitung in der Länge von  $\frac{3}{4}$  ersetzt. Mit dieser einfachen Maßnahme wurde eine Reichweite im einfach verbauten Gebiet erzielt, die wesentlich mehr als 100 Meter beträgt. Der grundsätzliche Aufbau ist ähnlich dem Evaluation Modul, besitzt jedoch noch zusätzlich zwei farbige LED's, die frei ansteuerbar sind.

Schaltungsbereiche im Hochfrequenzbereich sind äußerst kritisch in Bezug auf die Ausführung des PCB. Chipcon beschreibt in seinen Dokumentationen nicht nur den kompletten Aufbau eines Evaluation Moduls, sondern gibt auch gezielt Hinweise auf besonders kritische Bereiche bzw. Bauteile. Ein eigenständiger Entwurf eines PCB für dieses Projekt wurde nicht durchgeführt, die benötigten Funktionen ließen sich auf den verfügbaren Modulen demonstrieren. Ein ausführlicher Schaltungsentwurf ist jedoch im Anhang zu finden.

#### 4.9.2 Messmodul

Der Messteil des Systems wird um den Mikrocontroller MSP430F1222 der Firma Texas Instruments Incorporated gebildet. Dieser Mikrocontroller erlaubt die Entwicklung von Ultra Low Power Applikationen aufgrund seiner geringen Stromaufnahme von  $200 \mu\text{A}$  im aktiven Betrieb, sowie von lediglich  $0.7 \mu\text{A}$  im Standby Mode. Der Controller besitzt eine 16 Bit RISC Architektur, einen programmierbaren Timer, einen 10 Bit analog digital Konverter, ein serielles Interface zur Verwendung als asynchrone (UART) oder synchrone Kommunikation (SPI) sowie 22 programmierbare I/O's. Der Flash Speicher hat eine Größe von 4 kB. Eine eingebaute, programmierbare Spannungsreferenz und ein interner Temperatursensor schließen die Aufzählung der wichtigsten Eigenschaften ab.

Die Architektur der verwendeten Mikrocontroller ist gänzlich unterschiedlich, damit ist auch die Entwicklungsumgebung für den MSP eine gänzlich andere als für den CC1010. Verfügbar waren vier Messmodule, die ebenso wie die vier Chipcon Module, im Zuge eines Praktikums entwickelt worden sind. Die linken beiden Teilbilder der Abbildung 4-25 zeigen das Messmodul, wogegen im dritten Teilbild das Messmodul mit aufgestecktem Chipcon Sendemodul dargestellt ist.



*Abbildung 4-25: Messmodul*

Am PCB des Messmoduls sind, neben den zwei Buchsenleisten zur Aufnahme des Sendemoduls, die Anschlüsse zur seriellen Programmierung des MSP (In System Programming, ISP), Eingänge für den ADC sowie Anschlüsse zur Spannungsversorgung ausgeführt. Alle notwendigen Verbindungen zwischen Sende- und Messmodul, wie Kommunikation mittels SPI, die Spannungsversorgung und diverse zusätzliche Steuerleitungen, werden über die zwei Buchsenleisten realisiert. Wie bereits im Kapitel 3.4 erläutert, wird für einen low power Betrieb des Funknetzwerkes, der Chipcon größtenteils im power down Modus betrieben. Aus diesem wird er vom MSP mittels

RESET wieder aktiviert. Zur Unterscheidung ob die Aktivierung des Chipcon durch Anlegen der Stromversorgung oder durch den eben erwähnten RESET erfolgt, wurde eine gleichartige Schaltungsvariante mittels eines RC-Gliedes wie bei der Adresskodierung des Sensorknotens (siehe dazu Kapitel 4.4) verwendet. Dieses RC-Glied befindet sich auf dem Messmodul und hält beim Anlegen der Spannungsversorgung den entsprechenden I/O etwa 100 ms auf Low-Pegel. Dies veranlasst den Chipcon den Assoziationsvorgang, wie im Kapitel 4.4 beschrieben, zu starten. Wird der CC1010 hingegen durch den MSP reaktiviert, befindet sich der Pegel bereits auf High Niveau und das Programm verzweigt in eine andere Richtung. Beim Betrieb des Sendemoduls ohne Messteil, wie zur Programmevaluierung oftmals notwendig, musste dieser Umstand entsprechend berücksichtigt werden.

Im Gegensatz zum Development Kit des Chipcon stand für den MSP kein solcherart komfortables Entwicklungsboard zur Verfügung. Zur Fehlersuche bzw. zum Debugging konnte lediglich eine grüne LED am PCB des Messteiles herangezogen werden. Entsprechend kompliziert und langwierig gestaltete sich die Programmierung des MSP, besonders der Interkommunikation zwischen Chipcon und MSP.

Als Programmierumgebung und C-Compiler wurde das Programm ICC430 der Firma Imagecraft Creations Inc. verwendet. Der von Friedl zur Übertragung des Programmes auf den Microcontroller eingesetzte Adapter stand leider nicht zur Verfügung, da er zur gleichen Zeit von einem anderen Diplomanden verwendet wurde. Als Ersatz wurde ein JTAG-Adapter der Firma Megaton besorgt. Der JTAG-Adapter stellt einen standardisierten Programmiersockel dar, der zur Programmierung von Mikrocontrollern in fertigen Systemen (ISP) entwickelt wurde. Es gibt ihn für die verschiedensten Mikrocontrollerfamilien und für die gängigen Kommunikationsschnittstellen eines PC. Für dieses Projekt wurde ein Adapter mit parallelem PC-Anschluss gewählt. Der ISP-Anschluss der Messmodule entspricht leider nicht einem standardisiertem JTAG-Anschluss [MSPJ02], der Bau eines Zwischenadapters wurde dadurch notwendig. Die Übertragung des fertig compilierten Anwenderprogrammes mit Hilfe des JTAG-Adapters erfolgt komfortabel, direkt über die Menüführung des Compilers ICC430.

## 4.10 Temperatursensoren

Bei der Implementierung zur Temperaturmessung hat der Auftraggeber den Einsatz eines PT1000 als Temperaturfühlers angeregt.

Diese Messfühler werden aus Platin gefertigt und arbeiten auf der Grundlage der temperaturabhängigen elektrischen Widerstandsänderung einer Platinstrecke. Platin ist ein Kaltleiter, mit steigender Temperatur steigt sein Widerstand deshalb an (positiver Temperaturkoeffizient PTC). PT1000 Messfühler werden in Dünnschichttechnik hergestellt und in den unterschiedlichsten Ausführungen, Messbereichen und Toleranzklassen angeboten, die in der Norm nach DIN EN 60751 definiert sind.

Diese Norm definiert neben mechanischen Eigenschaften wie Erschütterungsfestigkeit und Stoßfestigkeit, auch elektrisch, wie die Größe des zulässigen Messstromes und die dadurch verursachte Selbsterwärmung, die Höhe des Isolationswiderstandes sowie die Ansprechzeit des Sensors bei Anwendung in verschiedensten Medien. Drei verschiedenen Klassen werden unterschieden, die den zulässigen Messbereich und die Genauigkeitstoleranzen, sowie den Temperaturkoeffizienten festlegen. Beispielsweise definiert die Klasse A einen zulässigen Temperaturbereich von  $-20 - +350$  °C bei einer Toleranz von:

$$\Delta T = \pm(0,15 + 0,002 \cdot |T|) \text{ [}^\circ\text{C]} \text{ [PT1000]} \quad \text{Formel 4-1}$$

Ein definierter Widerstand von 1000 Ohm bei einer Temperatur von 0 °C, der Temperaturkoeffizient von 3850 ppm/K, eine ausgezeichnete Langzeitstabilität und minimale Drift nach mehrjährigem Einsatz ermöglichen den problemlosen Austausch eingesetzter Fühler. Der Widerstandsverlauf für die Temperaturbereiche kleiner bzw. größer 0 °C ergeben sich zu [PT1000]:

für Temperaturen  $T \geq 0$

$$R(T) = R_0 \cdot (1 + A \cdot T + B \cdot T^2) \text{ [Ohm]} \quad \text{Formel 4-2}$$

und für Temperaturen  $T < 0$

$$R(T) = R_0 \cdot (1 + A \cdot T + B \cdot T^2 + C \cdot (T - 100^\circ\text{C}) \cdot T^2) \text{ [Ohm]} \quad \text{Formel 4-3}$$

mit

$$A = 3,9083 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

$$B = -5,775 \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-2}$$

$$C = -4,183 \cdot 10^{-12} \text{ }^\circ\text{C}^{-4}$$

Tabelle 4-7 zeigt einen Auszug der Abweichungen des Widerstandes, bzw. der Temperatur eines PT1000 im interessierenden Temperaturbereich.

Temperatur [°C]	Nennwiderstand [Ohm]	Toleranzklasse B		Toleranzklasse A	
		Widerstands- abweichung [Ohm]	Temperatur- abweichung [K]	Widerstands- abweichung [Ohm]	Temperatur- abweichung [K]
-30	882,22	1,78	0,45	0,83	0,21
-20	921,60	1,57	0,40	0,75	0,19
-10	960,86	1,37	0,35	0,67	0,17
0	1000,00	1,17	0,30	0,59	0,15
10	1039,03	1,36	0,35	0,66	0,17
20	1077,94	1,55	0,40	0,74	0,19
30	1116,73	1,74	0,45	0,81	0,21
40	1155,41	1,93	0,50	0,89	0,23
50	1193,97	2,12	0,55	0,96	0,25

**Tabelle 4-7: Abweichungen für Klasse A und B nach DIN EN 60751**

Der MSP430 besitzt einen eingebauten Analog/Digital Konverter mit einer Auflösung von 10 Bit und eine Referenzspannungsquelle in der Höhe von 2.5 V. Weiters benötigt der ADC neben den eigentlichen Messwert noch zwei Referenzeingänge, den positiven und den negativen Spannungsreferenzeingang. Bei Verwendung der eingebauten Referenzspannungsquelle ist somit der positive Referenzeingang des ADC bereits intern an diesen gekoppelt. Das Ergebnis der Digitalisierung errechnet sich mit der Eingangsspannung  $V_{IN}$ , der positiven Referenzspannung  $V_{R+}$  und der negativen Referenzspannung  $V_{R-}$  somit zu:

$$N_{ADC} = 1023 \cdot \frac{V_{IN} - V_{R-}}{V_{R+} - V_{R-}} \text{ [Bit] [MSP04]} \quad \text{Formel 4-4}$$

Die Aufgabenstellung definiert den Temperaturmessbereich von -25 bis +50 °C bei einer Auflösung von 0.2 K, dies erfordert eine Mindestanzahl digitaler Stellen von 375 Bit.

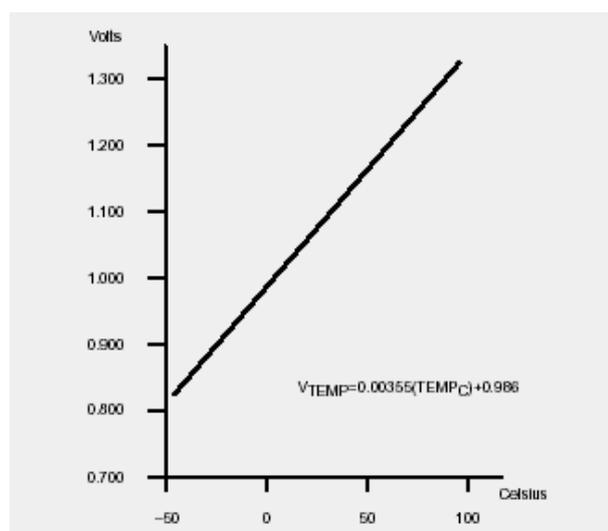
Der in der Norm empfohlene Messstrombereich liegt zwischen 0.3 und 1 mA. Im Interesse die Batteriebelastung so gering wie möglich zu halten sollte dieser so nahe wie möglich bei 0.3 mA liegen.

Unter Einsatz der **Formel 4-2** mit Vernachlässigung der quadratischen Terme ergibt sich damit ein Spannungsabfall am PT1000 von 0.2706 V bei -25 °C, sowie 0.3582 V bei +50 °C. Nun gilt es ein geeignetes Widerstandsnetzwerk einerseits zum Betrieb des PT1000, andererseits zur Festlegung der negativen Referenzspannung zu entwerfen. Dabei ergab sich jedoch, dass ein Betrieb der Referenzspannungsquelle gleichzeitig als Spannungsversorgung für den PT1000, sowie zu Bildung der negativen Referenzspannung für die geforderte Auflösung nicht möglich ist.

Die einzige Alternative bleibt in der Implementierung einer externen Referenz, wie z. B. den Halbleiter TL431 mit einer einstellbaren Referenzspannung im Bereich von 2.5 bis 36 V. Wird diese auf 2.5 V betrieben, kann sie über einen I/O Ausgang des MSP bei Bedarf ein- bzw. ausgeschaltet werden.

Das sich ergebende Widerstandsnetzwerk besteht aus zwei Vorwiderständen in der Größe von 1.5 kOhm, bzw. 560 Ohm für den PT1000, sowie aus der Serienschaltung von drei Widerständen 55 kOhm, 10 kOhm und 60 kOhm, die einen zweigeteilten Spannungsteiler für den negativen sowie den positiven Referenzspannungseingang des ADC bilden. Nach **Formel 4-4** ergibt sich damit im geforderten Temperaturmessbereich für die Auflösung ein Wert von etwa 580 Bit, womit für den geforderten Wert eine genügend große Reserve bleibt.

Als zusätzliches Feature besitzt der MSP430 einen eingebauten Temperatursensor. Dieser liefert eine temperaturproportionale Spannung von 3.55 mV/°C mit einer Genauigkeit von ±3 %. Die Transfer Funktion ist in Abbildung 4-26 dargestellt.



**Abbildung 4-26: Transfer Funktion des internen Temperatursensors des MSP [MSP04]**

Anwendung kann der interne Sensor z. B. bei reinen Raumtemperaturmessungen finden, wo das gesamte Sensorknotensystem an der interessierenden Stelle montiert wird und für eine ausreichende Belüftung der Halbleitenumgebung gesorgt wird. Aufgrund der äußerst geringen Stromaufnahme des MSP430, sowohl im Ruhezustand als auch im aktiven Betrieb, ist mit einer nennenswerten Eigenerwärmung des Sensors nicht zu rechnen.

Bei der programmtechnischen Ausführung werden sowohl der interne als auch ein eventuell angeschlossener externer Temperaturfühler berücksichtigt. Eine entsprechende Auswertung der gelieferten Daten wird dabei in der bereits erwähnten Internetdatenbank vorgenommen. Bei Fehlen eines externen Sensors muss dies ebenfalls in dieser vorgesehen werden, da das Sensorsystem dies nicht selbstständig erkennt.

## 4.11 S0-Eingänge

Bereits in Kapitel 3.3 wurden die S0-Ausgänge von Verbrauchszählern beschrieben. Erwähnt wurde, dass ein Impulszähleingang für die beiden unterschiedlichen Zählertypen (Wechselstromzähler, Gas- und Wasserzähler) mit Einsatz eines 1200Ohm Widerstandes realisiert werden kann. Erwähnt wurde auch die Notwendigkeit einer Spannungsversorgung von zumindest 12 V.

Mit den S0-Spezifikationen ergeben sich damit folgende Schwellenspannungen am Widerstand (Tabelle 4-8):

<i>Stromstärke S0</i>	<i>Logischer Pegel</i>	<i>Spannung</i>
= 10 mA	High	12 V
= 2,5 mA	Low	3 V

**Tabelle 4-8: Logische Pegel des S0-Einganges [S0]**

Diese Pegel müssen nun in geeigneter Form zur Impulszählung dem MSP430 zugeführt werden. Dazu werden I/O Ports als Eingang verwendet. Normalerweise befindet sich der MSP in seiner Ruhephase, aus der er periodisch zur Durchführung von Messungen in den aktiven Zustand versetzt wird. Um zu verhindern, dass ein Impuls an einem vorgesehenen S0-Eingang verpasst wird, wird der betreffende I/O per Software als Eingang konfiguriert. Dabei wird bei einer fallenden Flanke ein Interrupt Signal ausgelöst und der Prozessor in den aktiven Betrieb versetzt. Die Interruptquelle wird vom Programm ausgewertet und der betreffende Impulszähler erhöht. Danach versetzt sich der Prozessor wieder in seinen Ruhemodus zurück.

Der MSP430 wird ebenso wie der Chipcon CC1010 mit einer Spannung von 3 V betrieben. Die Schwellenspannungen zur Differenzierung von High- und Lowlevel der digitalen Eingänge sind in Tabelle 4-9 ersichtlich.

Eine Anpassung der Pegel des S0-Einganges an die erlaubten Spannungen des MSP erfolgt mit einem entsprechend dimensionierten Widerstandsnetzwerk, bestehend aus zwei in Serie geschalteten Widerständen. Am zweiten Widerstand erfolgt wiederum der Abgriff zum I/O Eingang des MSP. Zum Schutz vor eventuellen Überspannungsspitzen wurde hier noch eine Zenerdiode vorgesehen.

Ein wichtiger Punkt wurde noch außer acht gelassen, das Entprellen von Kontakten. Der S0-Ausgang eines Verbrauchszählers ist in der Regel mit einem mechanischen Schalter realisiert. Zur Glättung und Aussiebung durch Prellen verursachter Schwankungen ist ein Kondensator dem oben erwähnten Anpassungsschaltwerk zwischen I/O Eingang und Masse nachgeschaltet. Ohne Berücksichtigung des ohnehin sehr hohen Eingangswiderstandes des MSP, ergibt sich eine Zeitkonstante von etwa 0.12 ms. Diese Maßnahme sollte zum Entprellen ausreichen.

Der Schaltplan mit den Werten der erwähnten Bauteile ist im Anhang ersichtlich.

PARAMETER		TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
V <sub>IT+</sub>	Positive-going input threshold voltage	V <sub>CC</sub> = 2.2 V	1.1		1.5	V
		V <sub>CC</sub> = 3 V	1.5		1.9	
V <sub>IT-</sub>	Negative-going input threshold voltage	V <sub>CC</sub> = 2.2 V	0.4		0.9	V
		V <sub>CC</sub> = 3 V	0.9		1.3	
V <sub>hys</sub>	Input voltage hysteresis, (V <sub>IT+</sub> - V <sub>IT-</sub> )	V <sub>CC</sub> = 2.2 V	0.3		1.1	V
		V <sub>CC</sub> = 3 V	0.5		1	

**Tabelle 4-9: Schwellenspannungen digitaler Eingänge des MSP430F1222 [MSP04]**

# Kapitel 5

## Ergebnisse / Anregungen

Die Aufgabenstellung bestand in der Realisierung eines Sensorfunknetzwerkes mit einer Anbindung an das Feldbussystem LonWorks und einer Datenweiterleitung mittels GSM an eine Internetdatenbank. Im Zuge der Evaluierung der dazu notwendigen Komponenten wurden aus der ursprünglichen Aufgabe zwei eigenständige Projekte gebildet. Der Aufbau des Sensorfunknetzwerkes wurde im Rahmen dieser Diplomarbeit wahrgenommen.

Die entwickelte Variante eines wartungsfreien Funksensorsystems entspricht den Spezifikationen, wobei einige Punkte im positiven Sinne übertroffen wurden. Aber dennoch stellt die dargestellte Arbeit lediglich die erste Version dar, die sicherlich noch nicht alle Eventualitäten, die der tägliche Betrieb mit sich bringen mag, in sich vereint. So haben sich im Zuge der Tätigkeit einige Gedankengänge zu einer möglichen Verbesserung oder Erweiterung des Systems ergeben:

- Der Schaltungsentwurf einer Station enthält drei Quarze. Je zwei zur Taktung von Echtzeituhren von CC1010 und MSP und ein Quarz zur Generierung des Prozessortaktes am CC1010. Das Protokoll könnte in Hinblick der Einsparung zumindest eines Quarzes zur Echtzeituhrtaktung analysiert werden.
- Aus der Notwendigkeit der dauernden Energieversorgung von Sensorknoten zur Impulszählung, die sich aus den Spezifikationen der S0-Schnittstelle ergibt, bietet sich auch die Möglichkeit eine Repeaterfunktion zur Reichweitenerhöhung im Protokoll zu implementieren. Stationen, die sich nicht im unmittelbaren Empfangsbereich einer Basisstation befinden, könnten dennoch betrieben werden.
- Die verfügbare Speichergröße an der Basisstation ist mit 32 kB Flashspeicher begrenzt, daraus ergibt sich unter anderem die Eingrenzung des verfügbaren Adressbereiches auf 127 adressierbare Knoten und die Unmöglichkeit eingehende Sensorinformationen in der Basisstation zumindest für einen gewissen Zeitraum zu sammeln und erst später ans LonWorks weiter zu geben. Zusätzlicher externer Speicher würde dieses Manko beheben ist jedoch mit der derzeitigen Beschaltung des Funktransceivers nicht möglich. Diese und auch das Protokoll müsste demnach überarbeitet werden.
- Eine Zwischenspeicherung von Sensormessdaten wird in der realisierten Version nicht vorgenommen. In zeitlich periodischen Abständen wird eine Datenübertragung zur Basisstation durchgeführt. Sensorknoten könnten Messdaten z. B. für einen ganzen Tag sammeln und diese Information geblockt zu einem definierten Zeitpunkt an die Basisstation weitergeben. Voraussetzung dafür sind entsprechende Speichermöglichkeiten an der Sensor- wie auch an der Basisstation.
- Die Übertragung von Sensordaten soll nach der Aufgabenstellung in Zeitintervallen von fünf Minuten im Falle eines reinen Temperatursensors, bzw. fünfzehn Minuten im Falle eines Impulszählsensors durchgeführt werden. Unver-

meidlich sind dabei auftretende Kommunikationskollisionen, die durch das CSMA/CA Kanalzugriffsverfahren gehandhabt wird. Die sich dadurch ergebenden Wartezeiten und der Energieverbrauch der Knoten, die auf ein freies Übertragungsmedium warten, ließen sich durch eine definierte gestaffelte Übertragung vermeiden. Die Messergebnisse könnten nach wie vor zu den geforderten Zeitpunkten ermittelt werden, jedoch könnte die Übertragung mit einer zeitlichen Verzögerung, die beispielsweise mit der Knotenadresse gekoppelt wird, stattfinden.

- Der Funktransceiver ist für einen Betrieb im Bereich von 300-1000 MHz einsetzbar. Für einen Einsatz in den lizenzfreien Bereichen 315-433, 868 und 915 MHz sind in der Umgebung des Chips einige wenige Bauteile anzupassen, bzw. die Parameterwerte des Transceivers müssen per Software eingestellt werden. Somit sind die Schaltung und auch das Protokoll für einen weiten Frequenzbereich einsetzbar. Ein paralleler Betrieb von Netzen mit unterschiedlichen Frequenzbereichen ist damit ohne gegenseitige Störung möglich.
- Der Transceiver lässt sich sehr schnell auf eine neue Sendefrequenz innerhalb des Frequenzbereiches, der durch die äußere Beschaltung vorgegeben ist, mittels Software umstellen. Zur Störungsbekämpfung ließe sich ein Frequenzsprungverfahren (Frequency Hopping) implementieren.
- Die Kommunikation wird unverschlüsselt durchgeführt. Das Protokoll könnte um entsprechende Funktionen erweitert werden um eine abhörsichere Datenübertragung zu gewährleisten.

Die vorgestellte Lösung eines Funksensorsystemes stellt eine flexible und leicht erweiterbare Lösung dar. Der Batteriebetrieb oder der Einsatz von Solarzellen zur Energieversorgung über Jahre hinweg ist sichergestellt. Die Bauteilkosten einer voll ausgebauten Basisstation belaufen sich auf etwa 40 €, die eines Sensorknotens (Temperatur oder Impuls) auf etwa 36 €, wobei lediglich Einzelhandelspreise des Juni 2004 berücksichtigt wurden. Im Zuge einer Serienfertigung können diese sicherlich deutlich unterschritten werden. Berücksichtigt man noch die Kosten für eine Leiterplattenfertigung, sowie für Gehäuse und noch zusätzliche Bauteile, wurden auch in diesem Bereich die Vorgaben erfüllt, die mit maximal 100 € für einen Temperatursensorknoten, 200 € für einen Impulssensorknoten und 250 € für eine Basisstation angegeben waren.

# Literatur

- [TAN03] Tanenbaum Andrew S.: Computernetzwerke, 4., überarbeitete Auflage; ein Imprint der Pearson Education Deutschland GmbH, 2003
- [HEN92] Henshall John, Shaw Sandy: OSI praxisnah erklärt, Der Standard für die Computer-Kommunikation; Coediton der Verlage Carl Hanser und Prentice-Hall International, 1992
- [DIE99] Dietrich Dietmar: Bussysteme und Rechnerkommunikation in der Prozessautomatisierung; Vorlesungsskriptum, TU Wien, Institut für Computertechnik, 1999
- [GOR96] Gornik Erich: Halbleiter Teil2 (Kapitel 3 und 4); Vorlesungsskriptum, TU Wien, Institut für Festkörperelektronik, 1996
- [TAS03] Tanenbaum Andrew S., van Steen Marten: Verteilte Systeme, Grundlagen und Paradigmen; ein Imprint der Pearson Education Deutschland GmbH, 2003
- [FRIE03] Andreas Friedl: Feldbusintegration von Ultra Low Power Funksensoren; Diplomarbeit, TU Wien, Institut für Computertechnik, 2003
- [SEL96] Selzer Harald, Kämmerer Thomas: Moderne Computernetzwerke; Überblick und Technologie; Carl Hanser Verlag München Wien, 1996
- [WEB98] Weber Michael: Verteilte Systeme; Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg Berlin, 1998
- [STA00] Staiß Frithjof, Knaupp Werner: Photovoltaik, ein Leitfaden für Anwender; TÜV - Verlag GmbH, 2000
- [WEI98] Hans Weinrichter: Einführung in die Nachrichtentechnik; Vorlesungsskriptum, TU Wien, Institut für Nachrichtentechnik und Hochfrequenztechnik, 1998
- [KRE02] Harald Kreidl, Hans-Günter Kremser: Moderne Funkfernsteuersysteme im ISM-Bereich; Franzis' Verlag GmbH, 2002
- [SIE98] Wolf Siebel, Gerd Klawitter: Antennen Ratgeber; 5., völlig neubearbeitete Auflage, Siebel Verlag GmbH, Meckenheim, 1998
- [SUC95] Stefan Suckrow, Martin Böttcher, Mohammad Bashir, Bernd Edelmann: Stationäre und mobile Antennen; Verlag Technik GmbH Berlin, 1995
- [CCDS03] CC1010 Data Sheet, Rev 1.2; [www.chipcon.com](http://www.chipcon.com), Chipcon AS, 2003
- [CCDK03] CC1010DK Development Kit User Manual, Rev 2.01; [www.chipcon.com](http://www.chipcon.com), Chipcon AS, 2003

- [CCDE02] CC1010IDE Integrated Development Environment User Manual, Rev 1.4; [www.chipcon.com](http://www.chipcon.com), Chipcon AS, 2002
- [CCCALC] CC1010 Optimal Frequency Calculator, Rev 1.0; [www.chipcon.com](http://www.chipcon.com), Chipcon AS
- [KEIL00] Cx51 Compiler Optimizing C Compiler and Library Reference for Classic and Extended 8051 Microcontrollers; [www.keil.com](http://www.keil.com), KEIL Software, 2000
- [MSP04] MSP430x11x2, MSP430x12x2 Mixed Signal Microcontroller; [www.ti.com](http://www.ti.com), Texas Instruments Incorporated, 2004
- [MSPU04] MSP430x1xx Family User's Guide; [www.ti.com](http://www.ti.com), Texas Instruments Incorporated, 2004
- [MSPJ02] MSP430-JTAG for Programming and Flash Emulation with MSP430 Microcontrollers; [www.olimex.com/dev](http://www.olimex.com/dev), Olimex Ltd., 2002
- [DOPP02] Kasseler Symposium Energie-Systemtechnik 2002  
Doppelschichtkondensatoren - Technik, Kosten, Perspektiven  
[http://ecl.web.psi.ch/Publications/cap\\_pub/ISET2002.pdf](http://ecl.web.psi.ch/Publications/cap_pub/ISET2002.pdf)
- [SHAH03] Shahriar Rahman: Throughput Analysis of IEEE802.11 in Presence of Hidden Nodes; [www.stanford.edu/class/ee384y/projects/download03/shahriar.pdf](http://www.stanford.edu/class/ee384y/projects/download03/shahriar.pdf), 2003
- [BACH03] Bacher Christoph: Datatransmission via Waterpipes; Diplomarbeit am Institut für Computertechnik (E384), 2004
- [PT1000] Heraeus Sensor: Platin Messwiderstände  
[http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/150000-174999/172502-in-01-de-pt100\\_1\\_3\\_din\\_b\\_sensor\\_pt500\\_pt1000.pdf](http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/150000-174999/172502-in-01-de-pt100_1_3_din_b_sensor_pt500_pt1000.pdf), 1994

## Internetreferenzen

- [FHBochum] FH Bochum Solar Netz: Aufbau und Funktionsweise einer Solarzelle  
[www.fh-bochum.de/fb3/eglab/solar/solarenergie/funktionsweise.html](http://www.fh-bochum.de/fb3/eglab/solar/solarenergie/funktionsweise.html)
- [Photon] Photon das Solarstrom-Magazin: Lexikon  
[www.photon.de/old-stuff](http://www.photon.de/old-stuff)
- [Nuintek] nuinTEK  
SuperCap  
[www.nuintek.co.kr/html/English/Introduction/frame\\_Product.html](http://www.nuintek.co.kr/html/English/Introduction/frame_Product.html)
- [WiFi] Wi-Fi-Alliance  
[www.wi-fi.org](http://www.wi-fi.org)
- [WLAN] IEEE 802.11TM WIRELESS LOCAL AREA NETWORKS - The Working Group for WLAN Standards  
[grouper.ieee.org/groups/802/11](http://grouper.ieee.org/groups/802/11)
- [WPAN] IEEE 802.15 Working Group for WPAN  
[grouper.ieee.org/groups/802/15](http://grouper.ieee.org/groups/802/15)
- [Bluetooth] The Official Bluetooth Website  
[www.bluetooth.com](http://www.bluetooth.com)
- [ZigBee] ZigBee Alliance  
[www.zigbee.org](http://www.zigbee.org)
- [Envidatec] Envidatec Energiedienstleistungen  
[www.envidatec.de](http://www.envidatec.de)
- [Echelon] Echelon  
[www.echelon.com](http://www.echelon.com)
- [LonMark] LonMark  
[www.lonmark.org](http://www.lonmark.org)
- [Chipcon] Chipcon  
[www.chipcon.com](http://www.chipcon.com)
- [EnOcean] EnOcean, The power of unused energy  
[www.enocean.com](http://www.enocean.com)
- [SonyEric] Sony Ericsson  
[www.sonyericsson.com](http://www.sonyericsson.com)
- [Maxim] Maxim, Dallas Semiconductor  
[www.maxim-ic.com](http://www.maxim-ic.com)
- [Texas] Texas Instruments Incorporated  
[www.ti.com](http://www.ti.com)
- [Imagecraft] Imagecraft Creations Inc.  
[www.imagecraft.com](http://www.imagecraft.com)
- [S0] Deutsches Institut für Normung e.V.;  
DIN 43868, Ausgabe 1992-07  
<http://www2.din.de/>

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Graphische Darstellung gewonnener Verbrauchs- bzw. Zustandsdaten.....	2
Abbildung 1-2: Kühlzeile eines Supermarktes .....	3
Abbildung 1-3: Schema zur Aufgabenstellung.....	4
Abbildung 2-1: Die Schichten des OSI-Referenzmodells .....	8
Abbildung 2-2: Interaktions Zeit Schema eines bestätigten Dienstes .....	10
Abbildung 2-3: Blockschaltbild einer Nachrichtenübertragung.....	12
Abbildung 2-4: Prinzip einer Solarzelle .....	23
Abbildung 3-1: Betriebszustände für power safe Betrieb .....	30
Abbildung 3-2: Batterielebensdauer bei festem $I_{ps}$ .....	30
Abbildung 3-3: Batterielebensdauer bei festem $I_{ac}$ .....	31
Abbildung 3-4: Betriebsmodi, Auszug aus dem Datenblatt des CC1010 [CCDS03] .....	34
Abbildung 3-5: Gesamtschema .....	35
Abbildung 3-6: Grundelemente des Funknetzwerkes.....	37
Abbildung 3-7: Zusammenfassung der Funktionen .....	38
Abbildung 3-8: Schema der Schnittstellen.....	39
Abbildung 3-9: Stromverbrauchsanalyse.....	43
Abbildung 4-1: Funknetztopologie .....	48
Abbildung 4-2: Das Hidden-Node Problem .....	48
Abbildung 4-3: Kommunikationsbeziehungen zwischen Basisstation und Sensorknoten .....	49
Abbildung 4-4: Schema einer bestätigten Datenübermittlung (Idle-RQ) .....	50
Abbildung 4-5: Mögliche Übertragungsfehler bei Idle-RQ (links) Verlust eines Datenpakets bzw. (rechts) Verlust einer Bestätigung.....	50
Abbildung 4-6: Flussdiagramm zur Anmeldung.....	54
Abbildung 4-7: Schema der Kommunikation per SPI .....	55
Abbildung 4-8: Flusssteuerung der Master SPI-Kommunikation .....	56
Abbildung 4-9: Rahmentyp SPI-Master .....	57
Abbildung 4-10: Rahmentyp SPI-Slave .....	57
Abbildung 4-11: Rahmentypen für die UART-Kommunikation.....	58
Abbildung 4-12: Realisiertes Schichtenmodell nach OSI.....	59
Abbildung 4-13: Dienstzugangspunkte des realisierten Schichtenmodells.....	60
Abbildung 4-14: Allgemeines Rahmenformat des AI (APDU) .....	70

Abbildung 4-15: Rahmentypen der APDU.....	70
Abbildung 4-16: Rahmenformat des MAC-Layer (MPDU) .....	71
Abbildung 4-17: MAC-Frame Control .....	71
Abbildung 4-18: Rahmenformat des DATA-Typs .....	72
Abbildung 4-19: ACK-Rahmentypen: oberes Teilbild ACK-Rahmen einer Basisstation; unteres Teilbild ACK-Rahmen eines Sensorknotens .....	72
Abbildung 4-20: COMMAND-Rahmentyp.....	73
Abbildung 4-21: Aufbau der MAC-Payload des COMMAND-Rahmentyps .....	73
Abbildung 4-22: Rahmenformat des PHY-Layer (PPDU) .....	74
Abbildung 4-23: Evaluations Modul und Entwicklungsboard des CC1010 [CCDK03] .....	76
Abbildung 4-24: Funkmodul .....	76
Abbildung 4-25: Messmodul.....	77
Abbildung 4-26: Transfer Funktion des internen Temperatursensors des MSP [MSP04].....	80

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: WLAN - Modul .....	32
Tabelle 3-2: Bluetooth - Modul.....	33
Tabelle 3-3: MSP430F1222, low power Mikrocontroller .....	37
Tabelle 4-1: I/O - Verbindungen zur SPI-Steuerung .....	56
Tabelle 4-2: AI-SAP Dienstprimitive .....	61
Tabelle 4-3: PaP-SAP Dienstprimitive.....	63
Tabelle 4-4: PM-SAP Dienstprimitive .....	64
Tabelle 4-5: MLME/MCPS-SAP Dienstprimitive .....	65
Tabelle 4-6: PHY-SAP Dienstprimitive .....	68
Tabelle 4-7: Abweichungen für Klasse A und B nach DIN EN 60751 .....	79
Tabelle 4-8: Logische Pegel des S0-Einganges .....	81
Tabelle 4-9: Schwellenspannungen digitaler Eingänge des MSP430F1222 .....	82

## Anhang: Schaltplan

Der Schaltplan stellt eine voll ausgebaute Basisstation dar. Daraus lassen sich durch weglassen einzelner Komponenten die zwei Typen von Sensorknoten ableiten. Weiters besitzen einige Bauelemente in der Umgebung des CC1010 zwei verschiedene Werte. Dabei entspricht der erste Wert einem Betrieb im 433 MHz der zweite Wert einem Betrieb im 868 MHz Bereich. Genaueres dazu kann auch in der Anleitung zum Referenzdesign [CCDK03] von Chipcon nachgelesen werden.

Nachfolgend sind diejenigen Elemente, die eine Pegelanpassung zum Betrieb einer seriellen Schnittstelle vornehmen und zum Aufbau eines Sensorknotens nicht notwendig sind, aufgelistet:

- Die Kondensatoren C1X bis C5X
- Die Widerstände R16C, R17C, R27C, R29C
- Der 9-polige Stecker RS232
- Der Halbleiter MAX3223

Bauteile zur Realisierung einer Temperaturmessung mittels PT1000-Sensor sind:

- Die Widerstände R8M bis R19M, wobei R17M durch den Sensor gebildet wird.
- Der Halbleiter TL431

S0-Eingänge werden aus den nachfolgenden Bauelementen gebildet:

- S0-0: Den Widerständen R20M bis R22M, der Zenerdiode D1 sowie dem Kondensator C5M.
- S0-1: Den Widerständen R23M bis R25M, der Zenerdiode D2 sowie dem Kondensator C6M.
- S0-2: Den Widerständen R26M bis R28M, der Zenerdiode D3 sowie dem Kondensator C7M.

Bei Nichtbeschaltung sollte darauf geachtet werden, die entsprechenden Porteingänge am MSP430, P2.0, P2.1 und P2.2 gegen Masse zu legen.

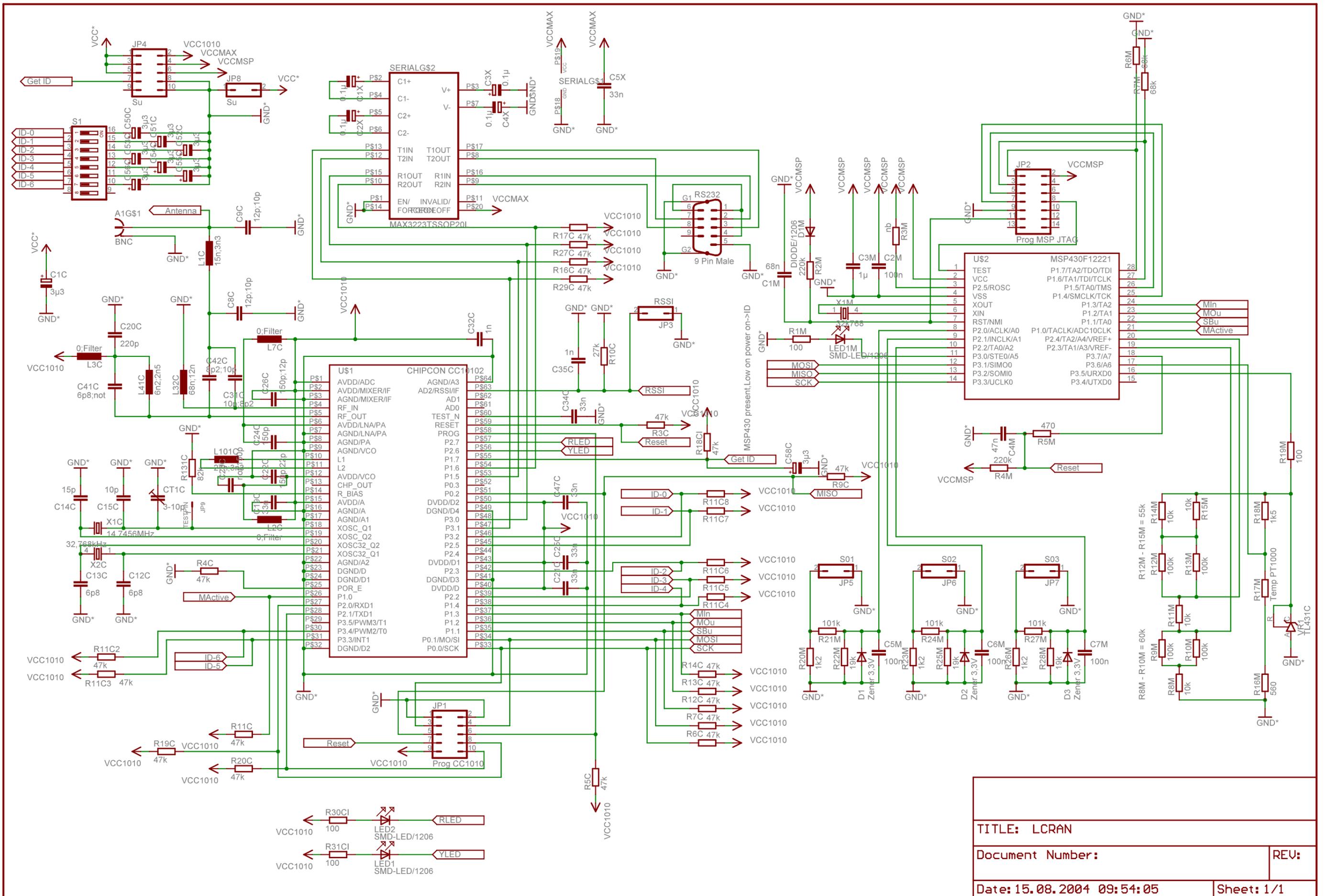
Die Bedeutung der Jumperblöcke ist der folgenden Auflistung zu entnehmen:

JP1 [Prog CC1010]      Sockel zur ISP-Programmierung des CC1010. Die Anschlussbelegung entspricht dem SPI-Programmierschluss des Chipcon Development Board.

JP2 [Prog MSP JTAG]	Socket zur ISP-Programmierung des MSP430. Die Anschlussbelegung entspricht dem JTAG-Standard
JP4 [Supply & Mode]	<p>1-2 Stromversorgung des Transceiverblocks um den CC1010</p> <p>3-4 Stromversorgung des Pegelkonverters der seriellen Schnittstelle</p> <p>5-6 Stromversorgung des Blocks um den MSP430</p> <p>7-8 Der Port P1.7 des CC1010 kann zum Zweck des Debugging dauerhaft auf Masse gelegt werden.</p> <p>9-10 nicht verwendet</p>
JP5 [S01]	<p>1 Masseanschluss</p> <p>2 S0-Eingang, erfordert eine zusätzliche Spannungsversorgung von zumindest 12 Volt.</p>
JP6 [S02]	<p>1 Masseanschluss</p> <p>2 S0-Eingang, erfordert eine zusätzliche Spannungsversorgung von zumindest 12 Volt.</p>
JP7 [S03]	<p>1 Masseanschluss</p> <p>2 S0-Eingang, erfordert eine zusätzliche Spannungsversorgung von zumindest 12 Volt.</p>
JP8 [Supply]	<p>1 Masseanschluss</p> <p>2 Anschluss der positiven Spannungsversorgung im Bereich von 2.7 bis 3.6 Volt.</p>

Die Bedeutung der drei implementierten Leuchtdioden ist nachfolgend erklärt:

LED1 [YLED]	Farbe gelb; signalisiert eine Kommunikation über die serielle Schnittstelle und findet lediglich bei der Basisstation Verwendung.
LED2 [RLED]	Farbe rot; signalisiert eine Kommunikation über das Medium Funk.
LED1M	Farbe grün; wurde lediglich des Debugging am MSP430 verwendet. Wird im normalen Betrieb nicht angesprochen.



TITLE: LCRAN	
Document Number:	REV:
Date: 15.08.2004 09:54:05	Sheet: 1/1