

# DIPLOMARBEIT

## EIN KONZEPT ZUR POSITIONSBESTIMMUNG DURCH LAUFZEITMESSUNG

Ausgeführt zum Zweck der Erlangung des akademischen Grades eines  
**Dipl.-Ing. (FH) für Computersimulation**  
an der Fachhochschule St. Pölten im Diplomstudiengang Computersimulation

Erstbegutachter:

**Dipl.-Ing. Dr. Christian Fabian**

Zweitbegutachter:

**FH-Prof. Dipl.-Ing. Wolfgang Franta**

ausgeführt von

**Richard Wurzer**

si011043

St. Pölten, am 14. Juni 2005

Unterschrift:

# Kurzfassung

Diese Arbeit befasst sich mit der Positionsbestimmung von Objekten im Nahbereich in geschlossenen Räumen.

Es wird ein Überblick über einige existierende Systeme zur Lokalisierung von Objekten gegeben. Unter Anwendung von Ideen und Prinzipien dieser Systeme wird dann ein Systemkonzept für ein eigenständiges Positionsbestimmungssystem vorgestellt. Ziel dieses Systems ist es, einen aktiven, batteriebetriebenen Sender (z.B. Ultraschall, Infrarot oder Funk) im Innenraum zu orten.

Es wird ein Konzept zur Positionsbestimmung durch Laufzeitdifferenzmessungen vorgestellt. Für dieses System wurde ein Zeitmessmodul realisiert, mit welchem sehr kleine Zeitdifferenzen im  $ns^1$  Bereich vermessen werden können. Es kann zur Messung von Laufzeitdifferenzen zwischen verschiedenen Empfängern eingesetzt werden, um daraus die Position eines Senders zu berechnen. Zur Berechnung der Position werden Berechnungsmethoden gezeigt, um eindimensionale und zweidimensionale Positionsberechnungen durchzuführen.

Als Schnittstelle zu dem Zeitmesssystem wurde eine PC Software entwickelt, über welche dem Benutzer die Messdaten und die daraus resultierende Position zur weiteren Verarbeitung zur Verfügung gestellt werden.

Das entwickelte System ist sehr modular aufgebaut und kann für weiterführende Untersuchungen und Experimente verwendet werden.

---

<sup>1</sup>Nanosekunde

# Abstract

This work deals with the problem of determining the position of objects in the surrounding area indoors.

An overview over some existing systems for the positioning of objects is given. By using several ideas and principles of some of these systems an attempt for a draft of an independent positioning system was made. The aim of this system was to locate an indoor transmitter (e.g. ultrasonic, infrared, radio) in a room.

A concept for determining the position of a transmitter with TDOA<sup>2</sup>-measurements is introduced. For this system a time-measurement-unit has been realized. This unit can measure short time differences in the range of  $ns^3$ . It can be used to measure the TDOA between different receivers and calculate the position of the transmitter. An arithmetic technique is used to calculate the position in one and two dimensional cases.

Some PC software application was developed as interface to the time-measurement-system. This software provides the user with the measured and calculated values for further processing.

The developed system is modular and can be used for further tests and experiments.

---

<sup>2</sup>Time Difference of Arrival

<sup>3</sup>nanosecond

# Inhaltsverzeichnis

|                                                         |           |
|---------------------------------------------------------|-----------|
| Abbildungsverzeichnis . . . . .                         | vi        |
| Tabellenverzeichnis . . . . .                           | viii      |
| Abkürzungsverzeichnis . . . . .                         | ix        |
| <b>1 Einleitung</b>                                     | <b>12</b> |
| 1.1 Motivation . . . . .                                | 12        |
| 1.2 Erkenntnisgegenstand . . . . .                      | 13        |
| 1.3 Anwendungen . . . . .                               | 13        |
| <b>2 Überblick und vorhandene Systeme</b>               | <b>14</b> |
| 2.1 Klassifikation . . . . .                            | 14        |
| 2.2 Techniken und Technologien . . . . .                | 15        |
| 2.3 Implementierte Systeme . . . . .                    | 15        |
| 2.3.1 Satellitennavigation . . . . .                    | 16        |
| 2.3.2 Navigation in Gebäuden . . . . .                  | 17        |
| 2.3.3 Netzwerkgestützte Navigation . . . . .            | 18        |
| <b>3 Systemkonzept</b>                                  | <b>21</b> |
| 3.1 Übersicht . . . . .                                 | 21        |
| 3.2 Positionsberechnung . . . . .                       | 22        |
| 3.2.1 Positionsbestimmung durch Trilateration . . . . . | 22        |
| 3.2.2 Numerische Lösung . . . . .                       | 25        |
| 3.3 Zeitmessmodul . . . . .                             | 27        |
| 3.3.1 Time to Digital Converter . . . . .               | 27        |
| 3.3.2 Kontroller und Schnittstelle . . . . .            | 28        |
| 3.3.3 Praktische Realisierung . . . . .                 | 31        |
| 3.4 PC-Software . . . . .                               | 33        |
| 3.4.1 Softwareanforderungen . . . . .                   | 33        |

|          |                                      |           |
|----------|--------------------------------------|-----------|
| 3.4.2    | Praktische Realisierung . . . . .    | 35        |
| 3.5      | Sender und Empfänger . . . . .       | 39        |
| 3.5.1    | Ultraschall . . . . .                | 39        |
| 3.5.2    | Funk . . . . .                       | 44        |
| 3.5.3    | Infrarot . . . . .                   | 45        |
| <b>4</b> | <b>Messungen und Ergebnisse</b>      | <b>47</b> |
| 4.1      | Zeitmessungen . . . . .              | 47        |
| 4.2      | Fazit . . . . .                      | 53        |
| <b>A</b> | <b>Dokumentation der Zeitmessung</b> | <b>54</b> |
| A.1      | Benutzerhandbuch des GUI . . . . .   | 54        |
| A.1.1    | Systemanforderungen . . . . .        | 54        |
| A.1.2    | Installation . . . . .               | 54        |
| A.1.3    | Bedienung . . . . .                  | 55        |
| A.2      | Hinweise zum Zeitmessmodul . . . . . | 61        |
| A.2.1    | Benützungshinweis . . . . .          | 61        |
| A.2.2    | Konfiguration . . . . .              | 61        |
| A.2.3    | Spezifikation der Eingänge . . . . . | 61        |
|          | <b>Literatur</b>                     | <b>62</b> |
|          | <b>Index</b>                         | <b>66</b> |

# Abbildungsverzeichnis

|      |                                                                                                                                           |    |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1  | Übersicht implementierter Systeme (Roth, 2002) . . . . .                                                                                  | 16 |
| 2.2  | Ein Beispiel für einen Gauss-Puls . . . . .                                                                                               | 19 |
| 3.1  | Aufbau des Positionsbestimmungssystems . . . . .                                                                                          | 22 |
| 3.2  | Die geometrische Anordnung der Empfänger und des Senders zur ein-<br>dimensionalen Positionsbestimmung . . . . .                          | 23 |
| 3.3  | Die Zeitverhältnisse zwischen den Empfängern und dem Sender zur ein-<br>dimensionalen Positionsbestimmung . . . . .                       | 23 |
| 3.4  | Die Zeitverhältnisse zwischen den Empfängern und dem Sender . . . . .                                                                     | 24 |
| 3.5  | Die geometrische Anordnung der Empfänger und des Senders . . . . .                                                                        | 25 |
| 3.6  | Idee des Newton Verfahrens . . . . .                                                                                                      | 26 |
| 3.7  | Prinzip Absolute delay time TDC (Acam Messelectronic Gmbh, 2004) . . . . .                                                                | 28 |
| 3.8  | Prinzipschaltbild des GP1 (Acam Messelectronic Gmbh, 2001, S. 6) . . . . .                                                                | 29 |
| 3.9  | Prinzip der Core-Spannungs Regelung . . . . .                                                                                             | 29 |
| 3.10 | Blockschaltbild des AN2131QC (Cypress Semiconductor, 2002b, S.21) . . . . .                                                               | 30 |
| 3.11 | Ein Beispiel für USB Pakete (Cypress Semiconductor, 2002b, S.22) . . . . .                                                                | 30 |
| 3.12 | Experimentator des Zeitmessmoduls . . . . .                                                                                               | 31 |
| 3.13 | Grobes Flussdiagramm der EZ-USB Firmware . . . . .                                                                                        | 32 |
| 3.14 | Ausschnitt aus der Gerätebeschreibungsdatei zeitmessung.inf . . . . .                                                                     | 35 |
| 3.15 | Gerätemanager mit dem Zeitmessmodul als USB-Gerät . . . . .                                                                               | 36 |
| 3.16 | Kommunikationsprotokoll zwischen Zeitmessung und Host . . . . .                                                                           | 36 |
| 3.17 | Ein Screenshot der Benutzeroberfläche . . . . .                                                                                           | 38 |
| 3.18 | Foto des verwendeten US-Senders . . . . .                                                                                                 | 41 |
| 3.19 | Richtcharakteristik 400ST/R160 bei 40kHz (Angus Technologie Limi-<br>ted, 2005, S. 1) . . . . .                                           | 41 |
| 3.20 | Berechneter maximaler Schalldruck $p_{max}$ des verwendeten US-Senders<br>bei $\alpha = 1.3$ in Abhängigkeit der Entfernung $r$ . . . . . | 42 |
| 3.21 | Oszilloskopbild der gesendeten Rechteckpulspakete . . . . .                                                                               | 43 |

|      |                                                                                                                   |    |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.22 | Oszilloskopbild des Sende- und Empfangssignals (in ca. 50cm Entfernung)                                           | 43 |
| 3.23 | Cramer-Rao Schranke für verschiedene Bandbreiten . . . . .                                                        | 44 |
| 3.24 | Einfache IR-Datenübertragung . . . . .                                                                            | 45 |
| 3.25 | Richtcharakteristik des verwendeten Emitters (Opto Diode Corp., 2004,<br>S. 2) . . . . .                          | 46 |
| 4.1  | Testsignal (Kanal2) zur Prüfung der Zeitmessung . . . . .                                                         | 48 |
| 4.2  | Messaufbau zur Prüfung der Messfehler der Zeitmessung . . . . .                                                   | 48 |
| 4.3  | Messfehler des Zeitmessmoduls (10000 Messungen) . . . . .                                                         | 49 |
| 4.4  | Messung der Laufzeit eines Gatters . . . . .                                                                      | 49 |
| 4.5  | Messung der Laufzeit von zwei Gattern . . . . .                                                                   | 50 |
| 4.6  | Laufzeitmessung von einem Stück Draht . . . . .                                                                   | 51 |
| 4.7  | Einzelmessung, Oszilloskop . . . . .                                                                              | 51 |
| 4.8  | Zeitdifferenzen zwischen Drähten mit einer Längendifferenz von 10cm,<br>20cm und 30cm (30000 Messungen) . . . . . | 52 |
| A.1  | Installation der Software mit dem Setup-Assistenten . . . . .                                                     | 57 |
| A.2  | Einrichten der Treiber für die Hardware Abschnitt 1 . . . . .                                                     | 58 |
| A.3  | Einrichten der Treiber für die Hardware Abschnitt 2 . . . . .                                                     | 59 |
| A.4  | Bedienung des GUI Teil 1 . . . . .                                                                                | 59 |
| A.5  | Bedienung des GUI Teil 2 . . . . .                                                                                | 60 |

# Tabellenverzeichnis

|     |                                                                                                      |    |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1 | USB Paket Identifikationstypen . . . . .                                                             | 31 |
| 3.2 | Beispiel für die Konvergenz des Newton Verfahrens für das nichtlineare<br>Gleichungssystem . . . . . | 37 |
| 4.1 | Vergleich der tatsächlichen Drahtlängen mit den Messwerten . . . . .                                 | 50 |
| A.1 | Jumperoptionen des Zeitmessmoduls . . . . .                                                          | 61 |
| A.2 | Eingangsspezifikation des Zeitmessmoduls bei ca. 20° C . . . . .                                     | 61 |



# Abkürzungsverzeichnis

|                                      |                                          |
|--------------------------------------|------------------------------------------|
| $\alpha$ .....                       | Winkel zwischen Strecke $s_b$ und $s_c$  |
| $\beta$ .....                        | Winkel zwischen Strecke $s_a$ und $s_c$  |
| $\beta_f$ .....                      | Bandbreite                               |
| $\mathbf{f}'$ .....                  | Jacobi-Matrix                            |
| $\mathbf{f}$ .....                   | Funktionenvektor des Gleichungssystems   |
| $\mathbf{g}$ .....                   | Tangentenabbildung                       |
| $\mathbf{x}$ .....                   | Variablenvektor des Gleichungssystems    |
| $\gamma$ .....                       | Winkel zwischen Strecke $s_a$ und $s_b$  |
| $\kappa$ .....                       | Adiabatexponent                          |
| $\mu b$ .....                        | Mikrobar                                 |
| $\sigma$ .....                       | Standardabweichung                       |
| $\sigma^2$ .....                     | Varianz                                  |
| $\Delta s$ .....                     | Wegänderung                              |
| $\Delta s_b$ .....                   | Änderung der Strecke $s_b$               |
| $\Delta t$ .....                     | Zeitänderung                             |
| $\Delta t_{ab}$ .....                | Zeitdifferenz zwischen Empfänger A und B |
| $\Delta t_{ac}$ .....                | Zeitdifferenz zwischen Empfänger A und C |
| $\ \boldsymbol{\varepsilon}\ $ ..... | Euklidische-Norm                         |
| $A$ .....                            | Empfänger A                              |
| $a$ .....                            | Abstand Empfänger B und C                |
| $B$ .....                            | Empfänger B                              |
| $b$ .....                            | Abstand Empfänger A und C                |
| $b_x$ .....                          | Horizontaler Abstand Empfänger A und C   |
| $b_y$ .....                          | Vertikaler Abstand Empfänger A und C     |
| $C$ .....                            | Empfänger C                              |
| $c$ .....                            | Abstand Empfänger A und B                |
| $c$ .....                            | Lichtgeschwindigkeit                     |
| $ds$ .....                           | differentielle Wegänderung               |
| $dt$ .....                           | differentielle Zeitänderung              |
| $k$ .....                            | Iterationsindex                          |
| $L$ .....                            | Schalldruckpegel in dB                   |
| $M$ .....                            | molare Masse                             |
| $m/s$ .....                          | Meter pro Sekunde                        |
| $nm$ .....                           | Nanometer                                |
| $ns$ .....                           | Nanosekunde                              |
| $p$ .....                            | Schalldruck                              |
| $p_0$ .....                          | Referenzschalldruck                      |

|                 |                                                  |
|-----------------|--------------------------------------------------|
| $Pa$ .....      | Pascal                                           |
| $ps$ .....      | Pikosekunde                                      |
| $R$ .....       | universelle Gaskonstante                         |
| $S$ .....       | Sender                                           |
| $T$ .....       | Temperatur in Kelvin                             |
| $t_0$ .....     | Sendezeitpunkt                                   |
| $t_a$ .....     | Empfangszeitpunkt im Empfänger A                 |
| $t_b$ .....     | Empfangszeitpunkt im Empfänger B                 |
| $t_c$ .....     | Empfangszeitpunkt im Empfänger C                 |
| $v$ .....       | Ausbreitungsgeschwindigkeit allgemein            |
| $v_s$ .....     | Schallgeschwindigkeit                            |
| $V_{eff}$ ..... | Effektivwert der Spannung in Volt.               |
| $V_{SS}$ .....  | Spitze-Spitze Wert der Spannung in Volt.         |
| A/D .....       | Analog/Digital                                   |
| API .....       | Application Programming Interface                |
| CMOS .....      | Complementary Metal-Oxid-Semiconductor           |
| dB .....        | Dezibel                                          |
| DLL .....       | Dynamik Link Library                             |
| FHSS .....      | Frequency Hopping Spread Spectrum                |
| GHz .....       | Gigahertz (1e9 Perioden/Sekunde)                 |
| GLONASS .....   | Global Navigation And Safety System              |
| GPS .....       | Global Positioning System                        |
| GUI .....       | Graphical User Interface                         |
| IR .....        | Infrarot                                         |
| ISM .....       | Industry Scientific and Medical                  |
| kHz .....       | Kilohertz (1000 Perioden pro Sekunde)            |
| LAN .....       | Local Area Network                               |
| LSB .....       | Least Significant Bit                            |
| MHz .....       | Megahertz (1e6 Perioden/Sekunde)                 |
| MOSFET .....    | Metal Oxid Semiconductor Field Effect Transistor |
| OOK .....       | On Off Keying                                    |
| PID .....       | Packet Identifikation                            |
| PID .....       | Product ID                                       |
| PLL .....       | Phase Lock Loop                                  |
| RAM .....       | Random Access Memory                             |
| RF .....        | Radio Frequency                                  |
| RFID .....      | Radio Frequency Identification                   |
| RSS .....       | Received Signal Strength                         |
| SDCC .....      | Small Device C Compiler                          |
| SIE .....       | Serial Interface Engine                          |
| SNR .....       | Signal to Noise Ratio                            |
| TDC .....       | Time to Digital Converter                        |
| TDOA .....      | Time Difference of Arrival                       |
| US .....        | Ultraschall                                      |
| USB .....       | Universal Serial Bus                             |
| UWB .....       | Ultra Wideband                                   |
| VID .....       | Vendor ID                                        |

|            |                                           |
|------------|-------------------------------------------|
| VOR .....  | Very High Frequency Omnidirectional Range |
| WLAN ..... | Wireless Local Area Network               |

# Kapitel 1

## Einleitung

### 1.1 Motivation

Eine Vielzahl von Anwendungen benötigen die Positionsbestimmung eines Objektes innerhalb eines geschlossenen Raumes oder eines Gebäudes. Eine Möglichkeit dies zu bewerkstelligen ist, einen aktiven Sender am Objekt zu befestigen, welcher Daten an einen oder mehrere Empfänger sendet. Mit verschiedenen Verfahren kann dann die Position des Senders, abhängig von der verwendeten Technologie, mit höherer oder niedrigerer Genauigkeit, bestimmt werden (Aitenbichler, 2003). Im Inneren von Gebäuden treten dabei jedoch Probleme aufgrund von Reflexionen auf (vgl. Ward u. a., 2003, S. 9). Es gibt verschiedenste Ansätze und bestehende Systeme für den Innenraum (vgl. Hightower und Borriello, 2001b). Viele von diesen arbeiten mit der Analyse von Empfangsfeldstärken<sup>1</sup> in Netzwerken oder sind Bandspreizverfahren<sup>2</sup>, welche nach Korrelation des Empfangssignals die Signallaufzeitdifferenzen zwischen den Sendern und Empfängern ermitteln. Das Hauptproblem bei solchen Systemen ist die schnelle Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen<sup>3</sup>, welche große Bandbreiten, hohe Frequenzen und ein hochgenaues Zeitmesssystem erfordern.

Mit dieser Arbeit soll festgestellt werden, wie und ob durch eine große Anzahl an Zeitdifferenzmessungen, zwischen von verschiedenen Empfängern empfangen Signalen, die Position des Senders bestimmt werden kann. Hauptaugenmerk wird dabei auf die praktische Realisierung einer geeigneten Zeitmessung und Datenverarbeitung gelegt.

Es werden zunächst Anwendungsgebiete für Positionsbestimmungsverfahren aufgezeigt. Danach wird ein Überblick über einige vorhandene Systeme gegeben. Abschnitt 3 stellt dann ein Konzept zur Positionsbestimmung durch Laufzeitdifferenzmessungen vor. Dazu wird eine Möglichkeit zur Positionsberechnung durch Trilateration<sup>4</sup> gezeigt und ein Zeitmessmodul entwickelt. Weiters wird die Tauglichkeit von Ultraschall, Funk und Infrarot untersucht und Probleme aufgezeigt. Danach

---

<sup>1</sup>Received Signal Strength, RSS

<sup>2</sup>Spread-Spectrum Verfahren

<sup>3</sup> $c \approx 3 \cdot 10^8 m/s$

<sup>4</sup>Ein Meßverfahren, mit dem Punkte nur durch Streckenmessungen bestimmt werden.

werden Messungen durchgeführt und die erreichten Ergebnisse dargestellt.

## 1.2 Erkenntnisgegenstand

Diese Arbeit möchte ein Konzept für die Ortung eines Senders im Nahbereich durch Laufzeitmessung erstellen.

Erkenntnisgegenstand der Arbeit soll die Realisierbarkeit eines einfachen Positionsbestimmungssystems im Nahbereich, basierend auf Laufzeitmessungen, sein. Es soll geklärt werden, ob eine bereits vorhandene Ultraschall-, Funk- oder Infrarottechnologie genutzt werden kann, um entsprechende aktive, autarke, batteriebetriebene Sender durch Laufzeitmessungen zu orten.

## 1.3 Anwendungen

Positionsbestimmungssysteme für den Nahbereich werden wie alle anderen Ortungssysteme in Anwendungen eingesetzt, in denen man wissen möchte wo sich ein Objekt oder eine Person im Raum befindet. Dies könnten zum Beispiel sein (vgl. Klein, 2004):

- Produktion, Automatisierungstechnik, Robotik
- Logistik (z.B. die Überwachung des Transports und der Lagerung von Objekten.)
- Die Bereitstellung von Information über den aktuellen Ort oder die Umgebung (z.B. einen Kunden im Supermarkt über Sonderangebote im aktuellen Regal informieren oder Touristen durch Ausstellungen führen.)
- Notrufsysteme (z.B. löst ein Hilferufsystem im Krankenhaus einen Arzt automatisch zum Patienten oder Eltern können die Position ihres vermissten Kindes im Vergnügungspark bestimmen.)
- Zutrittskontrolle und Protokollierung von Personen (vgl. Want u. a., 1992, S. 2)
- Verfolgung und Analyse von Bewegungen (z.B. die Analyse von Autorennen oder anderen Sportarten wie Fußball in Echtzeit.)
- Multimedia-Anwendungen, Computerspiele, Virtual-Reality

Die möglichen Anwendungen eines Positionsbestimmungssystems sind jedoch sehr stark von der Leistungsfähigkeit des Systems abhängig. So sind z.B. für Anwendungen in der Automatisierungstechnik meist hohe Genauigkeiten zur Positionierung notwendig. Die Größe der Sender und Empfänger spielt dabei aber meist eine untergeordnete Rolle. Zur Protokollierung von Personenbewegungen, z.B. im Sport, sind jedoch normalerweise höhere Reichweiten erforderlich. Zusätzlich müssen aber die Sender sehr klein und leicht sein, damit diese von Personen einfach und bequem getragen werden können.

# Kapitel 2

## Überblick und vorhandene Systeme

Folgendes Kapitel stellt vorhandene Technologien und einige existente Systeme zur Positionsbestimmung vor.

### 2.1 Klassifikation

Die Klassifikation von Systemen zur Positionsbestimmung hat viele Ebenen. Grundsätzlich kann zwischen relativer und absoluter Positionsbestimmung unterschieden werden. Mit einem relativen System wird die Änderung bezüglich einer vorherigen Position bestimmt, ein absolutes System bestimmt die Position unabhängig von vorherigen Werten (vgl. Zimmermann, 2001, S. 1). Weiters kann zwischen passiven und aktiven Objekten unterschieden werden. Passive Objekte haben keine aktive Versorgung (z.B. reflektierende Materialien), während aktive Objekte versorgt werden (z.B. Infrarot-Dioden) (vgl. Allen u. a., 2001, S. 31). Zusätzlich wird zwischen Tracking und Positioning unterschieden. Von Tracking spricht man, wenn die Position eines Objektes von einem Netzwerk bestimmt wird, hingegen ermittelt beim Positioning ein mobiles Objekt die eigene Position (vgl. Klein, 2004). In dieser Arbeit wird meist nicht genau zwischen Tracking und Positioning unterschieden, da durch Datenübertragung vom oder zum Objekt meist ein System in das Andere übergeführt werden kann.

Wichtige Parameter zum Vergleichen von verschiedenen Systemen sind (vgl. Ungerer und Bagci, 2004; Hightower und Borriello, 2001b):

- Reichweite - Wie groß ist die Reichweite des Gesamtsystems, aber auch einer Infrastruktureinheit?
- Skalierbarkeit - Wie groß ist die Anzahl der möglichen Benutzer, wie hoch ist die Anzahl der möglichen Infrastrukturelemente?
- Genauigkeit - Wie genau kann die Position bestimmt werden? Es kann hier noch zwischen Granularität (z.B. 1m) und statischer Präzision (z.B. in 80% der Fälle) unterschieden werden.
- Kosten - Wie teuer ist das System selbst, aber auch die Herstellung der notwendigen Infrastruktur? (z.B. die Montage von Empfängern oder die Installation von

Kabeln)

- Zuverlässigkeit - Wie reagiert das System auf Störungen? (z.B. Hindernisse oder andere Kommunikationssysteme)
- Dynamik - Wie oft kann die Position bestimmt werden, wie schnell darf sich ein Objekt bewegen?
- Ergebnis - Liefert das System eine physikalische Position (z.B. Längen- und Breitengrad) oder einen symbolischen Ort? (z.B. im Gebäude X in Raum Y)

Grundsätzlich ist es aber sehr schwierig verschiedene Systeme zu vergleichen, da die meisten Systemparameter gegenseitige Abhängigkeiten aufweisen und in den meisten Publikationen wichtige Parameter wie die Genauigkeit mit den dazugehörigen Randbedingungen nicht explizit angegeben sind.

## 2.2 Techniken und Technologien

Möchte man ein Objekt orten, kann man abhängig von der verwendeten Technologie folgende Techniken oder Kombinationen daraus verwenden (vgl. Hightower und Borriello, 2001a, S. 1):

- Triangulation<sup>1</sup>/Trilateration  
Diese verwenden die geometrischen Eigenschaften von Dreiecken zum Berechnen der Position des Objektes. Es wird entweder die Distanz zu verschiedenen Referenzpunkten gemessen und daraus die Position des Objektes berechnet oder es werden die Winkel zu den Referenzpunkten gemessen und daraus die Position ermittelt.
- Nachbarschaftsnähe zu bekannten Punkten  
Dabei wird nur festgestellt ob das Objekt „in der Nähe“ eines bekannten Ortes ist, z.B. durch physikalischen Kontakt oder einen RFID<sup>2</sup>-Sensor.
- Szenen Analyse  
Durch Beobachtung aus einem bestimmten Blickwinkel werden Rückschlüsse auf die Position eines Objektes gezogen, z.B. mit einer Bilderkennung.

## 2.3 Implementierte Systeme

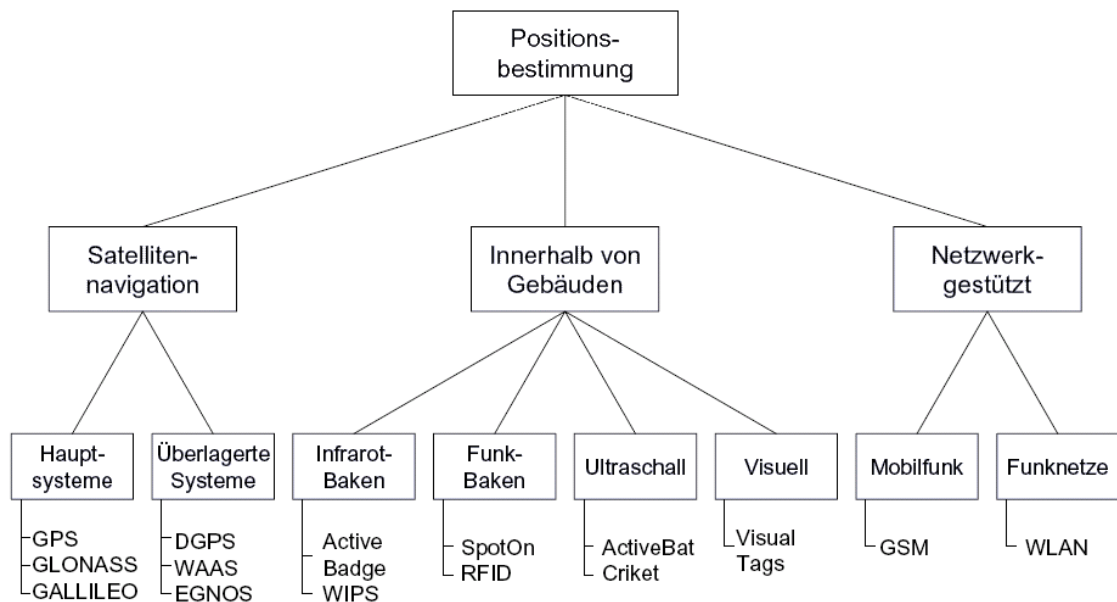
Dieser Abschnitt stellt einige implementierte Systeme vor. Der Schwerpunkt wird dabei auf Systeme die im Nahbereich oder in Gebäuden verwendet werden können gelegt. Es soll aber keinesfalls ein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben werden. Abbildung 2.1 auf der nächsten Seite entnommen aus (Roth, 2002), zeigt eine kleine Übersicht vorhandener Systeme, wobei klassische Funkpeilverfahren wie das VOR<sup>3</sup>-System

<sup>1</sup>Ein Messverfahren, mit dem ein Dreiecksnetz, nur durch Winkelmessung geschaffen wird.

<sup>2</sup>Radio Frequency Identification

<sup>3</sup>Very High Frequency Omnidirectional Range

oder das OMEGA-Verfahren nicht enthalten sind und auch hier nicht betrachtet werden.



**Abbildung 2.1:** Übersicht implementierter Systeme (Roth, 2002)

### 2.3.1 Satellitennavigation

Diese Systeme eignen sich nicht zur Verwendung in Gebäuden, da sie aber die wichtigsten Systeme zur Positionsbestimmung sind und Verfahren zur Indoornavigation oft Ideen dieser Systeme aufgreifen sollen sie hier kurz erwähnt werden.

Zur Zeit bestehen nur zwei Funknetze zur satellitengestützten Navigation: das amerikanische GPS<sup>4</sup> und das russische GLONASS<sup>5</sup> (Karamali und Wilson, 2002). Als weiteres System wird zur Zeit von der Europäischen Union und der Europäischen Weltraumorganisation das Navigationssystem GALILEO<sup>6</sup> entwickelt.

Diese Systeme sind sehr komplex, wobei die Funktionsweise bei allen ähnlich ist, ein Empfänger bestimmt aus mehreren zu genau bekannten Zeitpunkten gesendeten Daten durch Korrelation die Laufzeit der Daten zu den Satelliten und berechnet mit der bekannten Position dieser seine eigene.

<sup>4</sup>Weitere Infos dazu unter: <http://www.navcen.uscg.gov/gps/>

<sup>5</sup>Weitere Infos dazu unter: <http://www.glonass-center.ru>

<sup>6</sup>Weitere Infos dazu unter: [http://europa.eu.int/comm/dgs/energy\\_transport/galileo/index\\_de.htm](http://europa.eu.int/comm/dgs/energy_transport/galileo/index_de.htm)



## 2.3.2 Navigation in Gebäuden

### 2.3.2.1 Active Badge

Bei diesem System werden von IR<sup>7</sup>-Sendern (den sog. Beacons) eindeutige Codes an ein Sensornetzwerk gesendet. Diese Sensoren sind im gesamten Gebäude verteilt und werden von einer Masterstation abgefragt, welche dann den Ort des Senders bestimmt und Clients zur Verfügung stellt (vgl. Want u. a., 1992, S. 2). Das System liefert lediglich eine Aussage von welchem Empfänger ein Beacon registriert wurde. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von einer Positionsbestimmung durch aktive Landmarken.

### 2.3.2.2 WIPS

Das Positionsbestimmungssystem WIPS<sup>8</sup> verwendet eine Kombination aus IR und WLAN. Hier wird von, in Räumen fix montierten, IR Sendern die Rauminformation an die am Objekt befestigten IR-Empfänger gesendet. Diese senden die Information dann per WLAN an einen Server (vgl. Ljungh u. a., 2000, S. 1). Der Vorteil im Vergleich zu Active Badge ist, dass die IR-Sender nicht extra vernetzt werden müssen, sondern eine evtl. vorhandene WLAN Infrastruktur zur Datenübertragung verwendet werden kann.

### 2.3.2.3 SpotON

Dieses Funksystem misst die Feldstärke des Empfangssignals um die Distanz zwischen verschiedenen Sende- und Empfangsmodulen (sog. Tags) zu berechnen (vgl. Hightower u. a., 2001, S. 1).

### 2.3.2.4 RFID

Bei der Positionsbestimmung durch RFID<sup>9</sup>-Technologie handelt es sich ebenfalls um eine Positionsbestimmung durch Landmarken. RFID ist eine kontaktlose Datenübertragungstechnologie, die hauptsächlich zur Identifikation von Objekten verwendet wird. Dazu wird meist ein passiver Transponder verwendet, der keine eigene Stromversorgung enthält. Die Energie erhält dieser über elektromagnetische Kopplung zum Lesegerät. Die Reichweite ist bei passiven Geräten derzeit auf ca. 25cm beschränkt. Es gibt jedoch auch aktive Systeme mit denen viel größere Reichweiten erzielt werden können (vgl. Ahmann, 2004).

### 2.3.2.5 Active Bat

Die sog. Bats, die am Objekt sichtbar befestigt werden, enthalten einen Funk Transceiver und einen Ultraschallsender. An der Decke von Räumen sind Ultraschallempfänger

---

<sup>7</sup>Infrarot

<sup>8</sup>Wireless Indoor Positioning System

<sup>9</sup>Radio Frequency Identification

an bekannten Positionen montiert und über ein Netzwerk mit einer Basisstation verbunden. Diese sendet per Funk periodisch Nachrichten an die einzelnen Bats. Gleichzeitig werden über das Netzwerk die Ultraschallempfänger zurückgesetzt. Aufgrund der Benachrichtigung strahlt der jeweilige Bat einen Ultraschallimpuls ab. Die in Reichweite befindlichen Empfänger speichern dann den jeweiligen Empfangszeitpunkt des Ultraschallimpulses. Über die damit bekannte Laufzeit des Ultraschallsignals vom Bat zum Empfänger kann die Distanz berechnet werden. Empfangen mindestens drei nicht kollinare<sup>10</sup> Empfänger den Impuls, kann durch Trilateration, bzw. Multilateration<sup>11</sup> die Position des Bats berechnet werden (vgl. Harter u. a., 1999).

### 2.3.2.6 Cricket

So wie das System Active Bat verwendet Cricket auch die Laufzeitmessung von Ultraschallimpulsen und eine Synchronisierung und Signalisierung mit Funk. Die ebenfalls fix im Raum montierten Beacons senden jedoch gleichzeitig mit Daten per Funk einen Ultraschallimpuls an die tragbaren Geräte. Empfangen diese das RF<sup>12</sup>-Signal, aktivieren sie den Ultraschallempfänger. Da sich Funkwellen viel schneller ausbreitet als Ultraschall kennt das tragbare Gerät annähernd den Sendezeitpunkt des Ultraschallimpulses und kann damit die Laufzeit und Distanz zum Beacon berechnen. Empfängt ein tragbares Gerät mehrere Beacons, kann es selbstständig durch Trilateration die eigene Position berechnen (vgl. Priyantha u. a., 2000).

### 2.3.2.7 Visual Tags

Wie der Name des Systems schon sagt, handelt es sich dabei um ein visuelles Verfahren, bei dem Objekte mit sog. Visual Tags markiert werden. Das Verfahren arbeitet mit Videokameras und Bilderkennung (vgl. Priyantha u. a., 2000, S. 4).

## 2.3.3 Netzwerkgestützte Navigation

In Abbildung 2.1 auf Seite 16 werden unter netzwerkgestützte Systeme Mobilfunknetze und Funknetze eingeordnet. Systeme zum Orten von Mobiltelefonen werden hier nicht erwähnt, da man dabei sicherlich nicht vom Nahbereich sprechen kann. Die Einordnung mancher Systeme in dieses Kapitel ist nicht ganz eindeutig, man könnte einige sicherlich auch dem Abschnitt 2.3.2 zuordnen. Da aber alle hier aufgeführten Systeme Funknetze sind, wurden sie hier eingeordnet.

### 2.3.3.1 AeroScout

Dieses kommerzielle System hat eine Vielzahl an Funktionen, eine davon ist die Positionbestimmung von normalen WLAN Geräten und speziellen Tags durch Laufzeitdifferenz (TDOA) Messungen. Das System ist für den Einsatz in Gebäuden oder im

<sup>10</sup>Drei Punkte heißen kollinear, wenn sie auf einer Geraden liegen.

<sup>11</sup>Die Multilateration entspricht der Trilateration, es werden aber mehr als drei Punkte verwendet.

<sup>12</sup>Radio Frequency

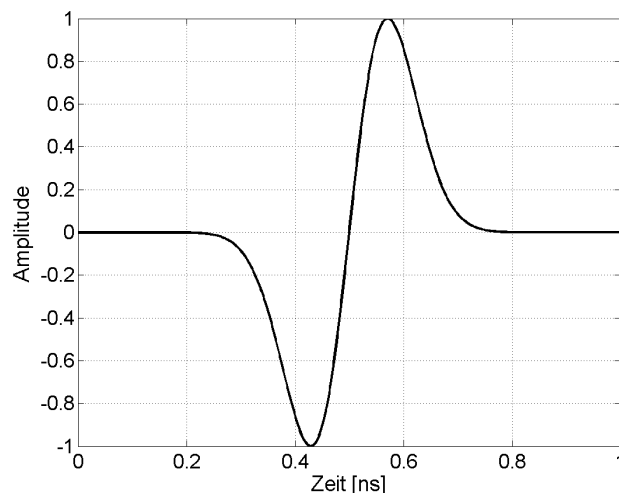
Freien geeignet und ist IEEE802.11 kompatibel, d.h. es arbeitet im  $2.4GHz$  Band als FHSS<sup>13</sup>-System (vgl. AeroScout Enterprise Visibility Solutions, 2004).

### 2.3.3.2 Witrack

Dieses System arbeitet ebenfalls mit der Messung von Laufzeitdifferenzen im  $2.4GHz$  ISM<sup>14</sup>-Band. Es soll als System zur Fußball- und Spielerlokalisierung eingesetzt werden und ermöglicht dabei die Ortung von bis zu 100 Sendern. Dazu sind bis zu zehn Empfänger am Spielfeldrand und an Flutlichtmasten montiert. Zusätzlich gibt es noch Referenzsender, um die Genauigkeit zu erhöhen. Die Empfänger sind über Glasfaserkabel mit einer Zentraleinheit verbunden, welche dann die Berechnungen durchführt. Das System erreicht bis zu 2000 Messungen pro Sekunde. Es ist nicht explizit angegeben, dass das System auch für den Einsatz in Gebäuden verwendbar ist. Als mögliche Anwendung ist jedoch Kundentracking in Supermärkten angegeben. Zusätzlich ist angegeben, dass aufgrund der Gebäudestruktur von Stadien auch Mehrwegeausbreitung berücksichtigt werden muss<sup>15</sup> (vgl. Gerhäuser, 2003).

### 2.3.3.3 Pulson

Pulson ist ein UWB<sup>16</sup>-System in dem gaußförmige Impulse mit Pulsbreiten von nur  $0.2 - 1.5ns$  gesendet werden. Diese Pulse erzeugen ein sehr breites Spektrum, ein z.B.  $0.5ns$  breiter Puls (Abbildung 2.2) erzeugt ein  $3dB$  Spektrum von  $2GHz$  (vgl. Yeung und Mitchell, S. 1). Auch in diesem System werden diese Pulsfolgen mit im Empfänger erzeugten Pulsfolgen korreliert, die Ausgangsamplitude des Korrelators ist dann ein Maß für die Phasenverschiebung (vgl. Time Domain Corp., 2001).



**Abbildung 2.2:** Ein Beispiel für einen Gauss-Puls

<sup>13</sup>Frequency Hopping Spread Spectrum

<sup>14</sup>Industry Scientific and Medical

<sup>15</sup>Weitere Infos dazu unter: [http://www.iis.fraunhofer.de/ec/app/sport/cairos/index\\_d.html](http://www.iis.fraunhofer.de/ec/app/sport/cairos/index_d.html)

<sup>16</sup>Ultra Wideband

#### 2.3.3.4 LPM

Das LPM<sup>17</sup>-System einer österreichischen Firma<sup>18</sup> ist dem System Witrack ähnlich. Im Produktfolder wird eine Auflösung von  $\pm 5cm$  und eine Reichweite von  $500m$  pro Zelle angegeben, wobei bis zu 30 Zellen kaskadierbar sind. Das System arbeitet mit einer Trägerfrequenz von  $5.8GHz$ , über die verwendete Technologie gibt es keine Angaben. Als Anwendungen für das System werden viele Sportarten, vor allem im Motorsportbereich, angegeben. Die Sender sind größer<sup>19</sup> als z.B. im Witrack System.

#### 2.3.3.5 TSI und Radianse

Diese Systeme arbeiten mit aktiven RFID Sendern welche Identifikationsdaten an Empfänger, die im Gebäude oder im Freien verteilt sind, senden. TSI ist als System für Gefängnisse konzipiert, Radianse ist ein Patiententrackingsystem für Spitäler, wobei die Empfänger an ein vorhandenes LAN angeschlossen werden können.<sup>20</sup>

---

<sup>17</sup>Local Position Measurement

<sup>18</sup>Weitere Infos dazu unter: <http://www.lpm-world.com>

<sup>19</sup>ca. 100x60x15mm

<sup>20</sup>Weitere Infos dazu unter: <http://www.radianse.com> und <http://www.tsilink.com>

# Kapitel 3

## Systemkonzept

Im vorigen Kapitel wurden mögliche Anwendungen und bestehende Systeme diskutiert, da aber die praktische Realisierung eines Positionsbestimmungssystems im Vordergrund steht, wird hier ein Konzept für ein Positionsbestimmungssystem beschrieben. Zunächst wird ein Überblick gegeben, danach werden die einzelnen Systemkomponenten genauer behandelt.

### 3.1 Übersicht

Abbildung 3.1 auf der nächsten Seite zeigt den grundsätzlichen Aufbau des Systems.

Ein am zu ortenden Objekt montierter Sender strahlt ein Signal möglichst omnidirektional im Raum ab. Dieses wird von mehreren<sup>1</sup> Empfängern mit bekannten Positionen empfangen. Über Kabeln werden die empfangenen Signale an eine Zeitmesseinheit übertragen. Diese misst die Zeitdifferenzen zwischen bestimmten Flanken der verschiedenen Empfänger und überträgt die Ergebnisse zu einem PC auf dem eine Software die Daten aufbereitet. Anschließend wird die Position des Senders berechnet und dem Anwender zur Verfügung gestellt. Folgend werden die einzelnen Komponenten des Systems (vgl. Abbildung 3.1 auf der nächsten Seite) erläutert. Zuerst wird eine Möglichkeit zur Positionsberechnung vorgestellt, danach wird die Realisierung der Zeitmessung beschrieben und die Entwicklung der zugehörigen PC-Software erarbeitet. Die Auswahl von geeigneten Sendern und Empfängern wird abschließend behandelt.

---

<sup>1</sup>Für die Bestimmung der eindimensionalen Position sind mindestens zwei Empfänger erforderlich, für die zweidimensionale Position sind mindestens drei erforderlich. (vgl. Abschnitt 3.2.1)

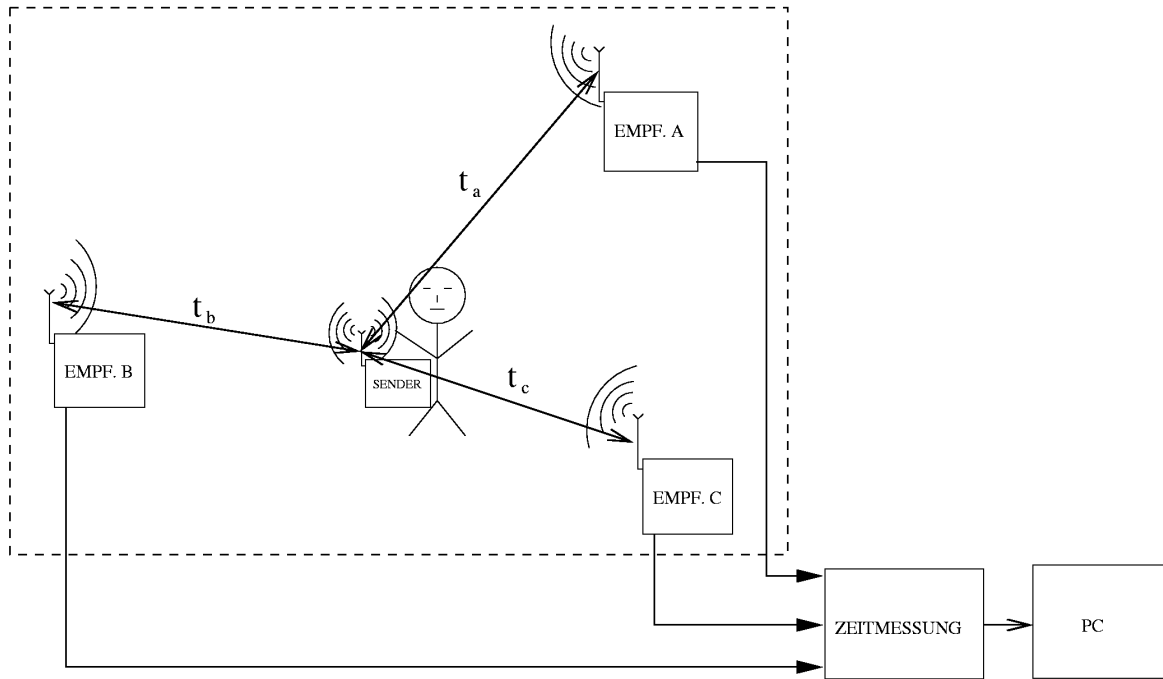


Abbildung 3.1: Aufbau des Positionsbestimmungssystems

## 3.2 Positionsberechnung

### 3.2.1 Positionsbestimmung durch Trilateration

Der zurückgelegte Weg des Sendesignals ist

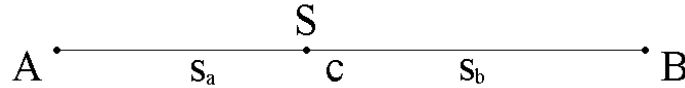
$$ds = v \cdot dt \quad \text{oder} \quad \Delta s = v \cdot \Delta t \quad (3.1)$$

wobei die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $v$  abhängig von der Technologie mit der Lichtgeschwindigkeit (siehe Abschnitt 1.1) oder mit der Schallgeschwindigkeit (siehe Abschnitt 3.5.1.1) angenommen wird.

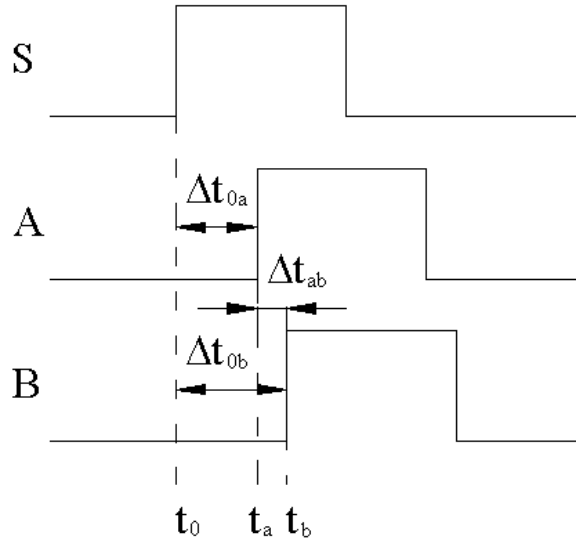
#### 3.2.1.1 Eindimensional

Um die eindimensionale<sup>2</sup> Position eines Senders  $S$  zwischen zwei Empfängern  $A$  und  $B$  durch Messung von Signallaufzeitdifferenzen eindeutig zu bestimmen, ohne seine Systemzeit zu kennen, ist es notwendig den Abstand  $c$  zwischen  $A$  und  $B$  zu kennen. Der Abstand zwischen Empfänger  $A$  und Sender  $S$  wird mit  $s_a$  bezeichnet, die Strecke von  $B$  nach  $S$  wird mit  $s_b$  bezeichnet, Abbildung 3.2 auf der nächsten Seite zeigt dies. Sendet der Sender  $S$  zum Zeitpunkt  $t_0$  ein Signal, so wird dieses, abhängig von der jeweiligen Position, von Empfänger  $A$  zum Zeitpunkt  $t_a$  von  $B$  zum Zeitpunkt  $t_b$  empfangen. Die Zeitdifferenz zwischen  $t_0$  und  $t_a$  wird mit  $\Delta t_{0a}$  bezeichnet, analog erfolgt die Bezeichnung von  $\Delta t_{0b}$ . Die Zeitdifferenz zwischen  $t_a$  und  $t_b$  wird mit  $\Delta t_{ab}$  bezeichnet (siehe Abbildung 3.3 auf der nächsten Seite). Mit Gleichung 3.1 ergibt sich

<sup>2</sup>Als eindimensional wird hier die Verschiebung auf einer Geraden verstanden.



**Abbildung 3.2:** Die geometrische Anordnung der Empfänger und des Senders zur eindimensionalen Positionsbestimmung



**Abbildung 3.3:** Die Zeitverhältnisse zwischen den Empfängern und dem Sender zur eindimensionalen Positionsbestimmung

aus den beschriebenen Zusammenhängen

$$\begin{aligned} s_a &= v(t_a - t_0) = v \cdot \Delta t_{0a} \\ s_b &= v(t_b - t_0) = v \cdot \Delta t_{0b} \end{aligned} \quad , \quad (3.2)$$

weiter erhält man daraus

$$s_a - s_b = v(t_a - t_b) = -v \cdot \Delta t_{ab} \quad . \quad (3.3)$$

Setzt man nun für  $s_b$

$$s_b = c - s_a \quad (3.4)$$

erhält man die Strecke  $s_a$  und damit die Position von  $S$  mit

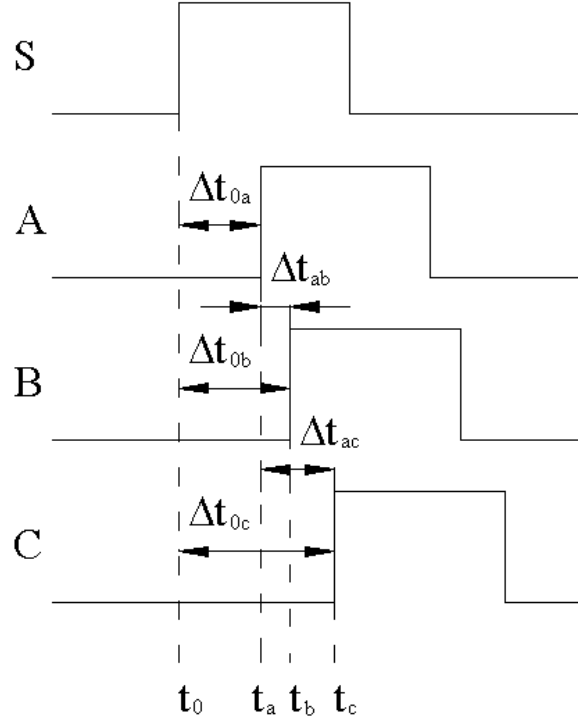
$$s_a = \frac{c - v \cdot \Delta t_{ab}}{2} \quad . \quad (3.5)$$

### 3.2.1.2 Zweidimensional

**Allgemein** Um die zweidimensionale Position eines Senders durch die Messung von Signallaufzeitdifferenzen eindeutig<sup>3</sup> zu bestimmen, ohne seine Systemzeit zu kennen, ist es notwendig das Sendesignal mit mindestens drei Empfängern zu empfangen. Um die absoluten Laufzeiten der Signale und damit die Position des Senders  $S$  aus

<sup>3</sup>Die Position ist nur innerhalb der Grenzen des Dreiecks  $A, B$  und  $C$  eindeutig.

den gemessenen Zeitdifferenzen  $\Delta t_{ab}$  und  $\Delta t_{ac}$  (Abbildung 3.4) zu berechnen, ist es auch notwendig die Positionen der drei Empfänger  $A$ ,  $B$  und  $C$  genau zu kennen (Abbildung 3.5 auf der nächsten Seite). Zur einfacheren Vermessung wird hier die



**Abbildung 3.4:** Die Zeitverhältnisse zwischen den Empfängern und dem Sender

Anordnung der Empfänger so gedreht, dass  $A$  und  $C$  auf einer Horizontalen liegen. Die Bezeichnungen der Laufzeiten und Laufzeitdifferenzen sind wie in Abschnitt 3.2.1.1 gewählt, die Zuordnung der einzelnen Winkel und Strecken kann Abbildung 3.5 auf der nächsten Seite entnommen werden.

Mit Gleichung 3.1 auf Seite 22 erhält man nun um eine Beziehung mehr als in Gleichung 3.2 auf der vorherigen Seite. Man erhält folgendes Gleichungssystem.

**Gleichungssystem** Das Gleichungssystem

$$\begin{aligned} s_a &= v(t_a - t_0) = v \cdot \Delta t_{0a} \\ s_b &= v(t_b - t_0) = v \cdot \Delta t_{0b} \\ s_c &= v(t_c - t_0) = v \cdot \Delta t_{0c} \end{aligned} \quad (3.6)$$

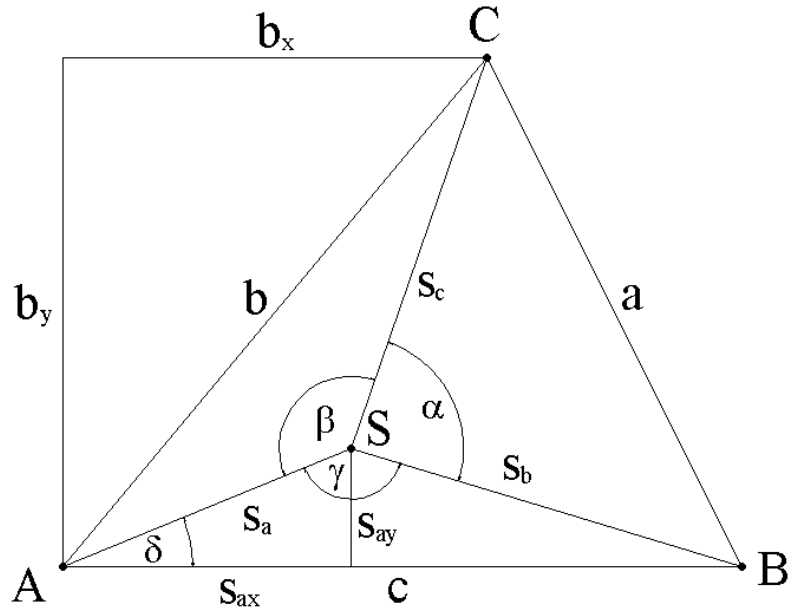
kann in das äquivalente Gleichungssystem

$$\begin{aligned} s_a - s_b &= v(t_a - t_b) = -v \cdot \Delta t_{ab} \\ s_a - s_c &= v(t_a - t_c) = -v \cdot \Delta t_{ac} \end{aligned} \quad (3.7)$$

mit den gemessenen und damit bekannten Zeitdifferenzen  $\Delta t_{ab}$  und  $\Delta t_{ac}$  umgeformt werden. Mit dem Cosinussatz kann dann die Geometrie (Abbildung 3.5 auf der nächsten Seite) beschrieben werden.

$$\begin{aligned} a^2 &= s_b^2 + s_c^2 - 2s_b s_c \cos \alpha \\ b^2 &= s_a^2 + s_c^2 - 2s_a s_c \cos \beta \\ c^2 &= s_a^2 + s_b^2 - 2s_a s_b \cos \gamma \end{aligned} \quad (3.8)$$





**Abbildung 3.5:** Die geometrische Anordnung der Empfänger und des Senders

Mit der Winkelsumme

$$\alpha + \beta + \gamma = 360^\circ \quad (3.9)$$

erhält man das Gleichungssystem

$$\begin{aligned} v(t_a - t_b) - s_a + s_b &= 0 \\ v(t_a - t_c) - s_a + s_c &= 0 \\ s_b^2 + s_c^2 - a^2 - 2s_b s_c \cos \alpha &= 0 \\ s_a^2 + s_c^2 - b^2 - 2s_a s_c \cos \beta &= 0 \\ s_a^2 + s_b^2 - c^2 - 2s_a s_b \cos \gamma &= 0 \\ \alpha + \beta + \gamma - 360 &= 0 \end{aligned} \quad (3.10)$$

Das durch Gleichung 3.10 gegebene Gleichungssystem muss für jede Positionsberechnung gelöst werden. Da es sich hierbei um ein nichtlineares Gleichungssystem handelt, ist ein entsprechendes Verfahren zu verwenden. Ist schon eine Näherungslösung für ein solches Gleichungssystem bekannt, so kann mit dem Newtonschen Verfahren versucht werden beliebig genaue Lösungen zu finden (vgl. Burg u. a., 2001, S. 498). Normalerweise ist eine neue Position des Senders in der Nähe der alten Position, daher ist das Newton Verfahren zur iterativen Lösung sicherlich geeignet und es ist davon auszugehen dass die Lösung schnell konvergiert.

### 3.2.2 Numerische Lösung

Nun wird das Newton Verfahren zur numerischen Lösung des Gleichungssystems kurz erläutert.

Das Gleichungssystem 3.10 auf der vorherigen Seite kann mit

$$\mathbf{f} = \begin{bmatrix} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \vdots \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

in Matrizenschreibweise zu

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \quad (3.12)$$

verallgemeinert werden.

Liegt eine bereits bekannte Lösung  $\mathbf{x}_0$  in der Nähe der exakten Lösung  $\mathbf{x}$ , so kann die Tangentenabbildung (vgl. Burg u. a., 2001, S. 499)

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}_1) = \mathbf{f}(\mathbf{x}_0) + \mathbf{f}'(\mathbf{x}_0) \cdot (\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_0) = \mathbf{0} \quad (3.13)$$

anstelle von  $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}$  gelöst werden. Abbildung 3.6 (vgl. Burg u. a., 2001, S. 274) zeigt dies für eine Gleichung. Diese Lösung ist zwar nur eine Näherung, jedoch handelt es sich dabei jetzt um ein lineares Gleichungssystem welches leicht gelöst werden kann. Nach der Lösung dieses Gleichungssystems kann Gleichung 3.13 mit der neuen Lösung  $\mathbf{x}_1$  wieder angewendet werden. Man erhält so eine Folge von Lösungen, welche gegen die exakte Lösung konvergiert. Wenn man die allgemeine Form

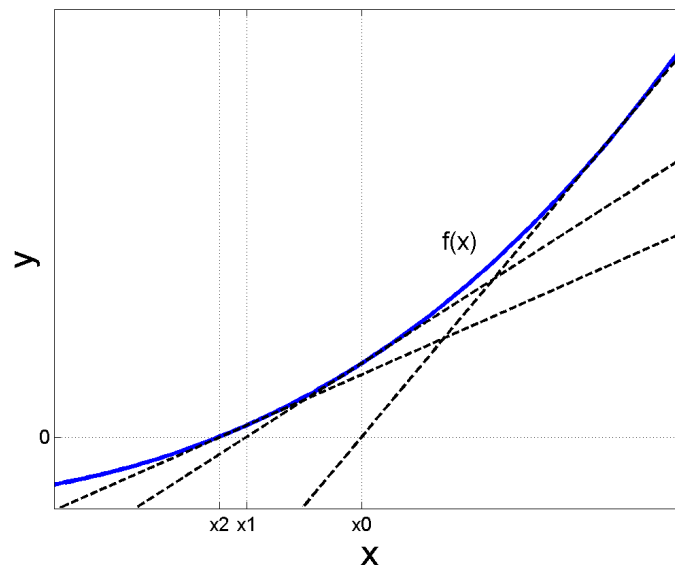


Abbildung 3.6: Idee des Newton Verfahrens

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}_k) + \mathbf{f}'(\mathbf{x}_k) \cdot (\mathbf{x}_{k+1} - \mathbf{x}_k) = \mathbf{0} \quad (3.14)$$

der Tangentenabbildung nach  $\mathbf{x}_{k+1}$  auflöst, erhält man die Rechenvorschrift des Newton Verfahrens.

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k - \mathbf{f}'(\mathbf{x}_k)^{-1} \mathbf{f}(\mathbf{x}_k), \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (3.15)$$

Um dieses Verfahren anwenden zu können, muss eine Startnäherung  $\mathbf{x}_0$  bekannt sein. Als erste Startnäherung kann hier z.B. der Mittelpunkt des Dreiecks gewählt

werden. Für die folgenden Startnäherungen können dann die vorigen Lösungen der Positionsberechnung herangezogen werden.

Voraussetzung zur Lösung der Aufgabe ist, dass alle Funktionen des Gleichungssystems mindestens einmal stetig differenzierbar sind, um die in Gleichung 3.15 auf der vorherigen Seite notwendige Jacobi-Matrix berechnen zu können (vgl. Schwarz, 1997, S. 256). Diese muss wiederum regulär sein, um ihre Inverse bilden zu können. Genauere Betrachtungen dazu können z.B. in (Schwarz, 1997) nachgelesen werden.

Die quadratische Jacobi-Matrix ist allgemein (vgl. Schwarz, 1997, S. 255)

$$\mathbf{f}'(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(\mathbf{x})}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1(\mathbf{x})}{\partial x_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_n(\mathbf{x})}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n(\mathbf{x})}{\partial x_n} \end{bmatrix}, \quad (3.16)$$

für das Gleichungssystem zur Positionsberechnung erhält man aus Gleichung 3.10 auf Seite 25

$$\mathbf{f}'(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2s_b - 2s_c \cos \alpha & 2s_c - 2s_b \cos \alpha & 2s_b s_c \sin \alpha & 0 & 0 \\ 2s_a - 2s_c \cos \beta & 0 & 2s_c - 2s_a \cos \beta & 0 & 2s_a s_c \sin \beta & 0 \\ 2s_a - 2s_b \cos \gamma & 2s_b - 2s_a \cos \gamma & 0 & 0 & 0 & 2s_a s_b \sin \gamma \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.17)$$

Mit Gleichung 3.10, 3.15 und 3.17 kann dieses Verfahren nun zur Berechnung der Position verwendet werden.

## 3.3 Zeitmessmodul

### 3.3.1 Time to Digital Converter

Um sehr kleinen Zeitdifferenzen im Bereich von einigen *ns* oder sogar im *ps* Bereich, wie sie hier auftreten, zu messen, sind sehr leistungsfähige A/D-Wandler notwendig. Eine Alternative dazu stellen sog. TDC's<sup>4</sup> dar. Am Markt sind dazu von verschiedensten Herstellern (Lecroy, Fastcomtec, Higland, Philips) Produkte verfügbar. Meist handelt es sich dabei aber um komplette Module, die relativ teuer sind. Die Firma Acam<sup>5</sup> bietet einen günstigen TDC-Chip GP1 mit einer Auflösung von 250ps(125ps)<sup>6</sup> an.

Digitale TDC's wie der verwendete GP1 benutzen Laufzeiten von Gattern (z.B. Invertern) zur feinen Abstufung von Zeitdifferenzen, man unterscheidet dabei zwei Typen (vgl. Acam Messelectronic GmbH, 2004):

- Absolute delay time TDC's

Diese verwenden absolute Laufzeiten durch Gatter, es wird z.B. gezählt wie oft

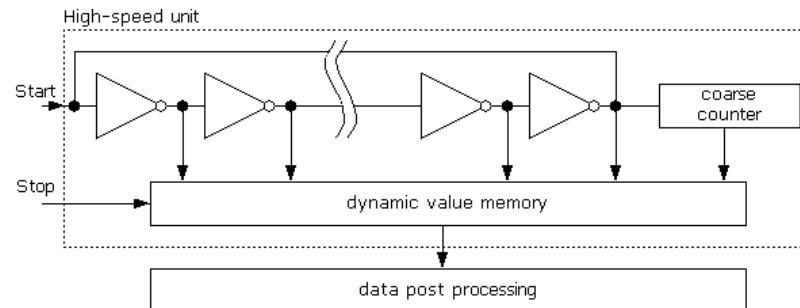
---

<sup>4</sup>Time to Digital Converter

<sup>5</sup>Weitere Infos dazu unter: <http://www.acam.de>

<sup>6</sup>Bei Verwendung von zwei Kanälen hat der GP1 laut Datenblatt eine typische Auflösung von 250ps, im Einkanal-Modus 125ps.

das Signal innerhalb des zu messenden Zeitintervalls invertiert wurde, Abbildung 3.7 zeigt dies (Acam Messelectronic GmbH, 2004). Die Auflösung ist vom Herstellungsprozess abhängig und liegt bei heutigen CMOS Prozessen bei 14-100ps. Ihr Vorteil ist, dass die Laufzeit der Gatter durch PLL's<sup>7</sup> eingestellt und stabilisiert werden kann, damit lässt sich die Auflösung Quarzgenau einstellen.



**Abbildung 3.7:** Prinzip Absolute delay time TDC (Acam Messelectronic GmbH, 2004)

- Relative delay time TDC's

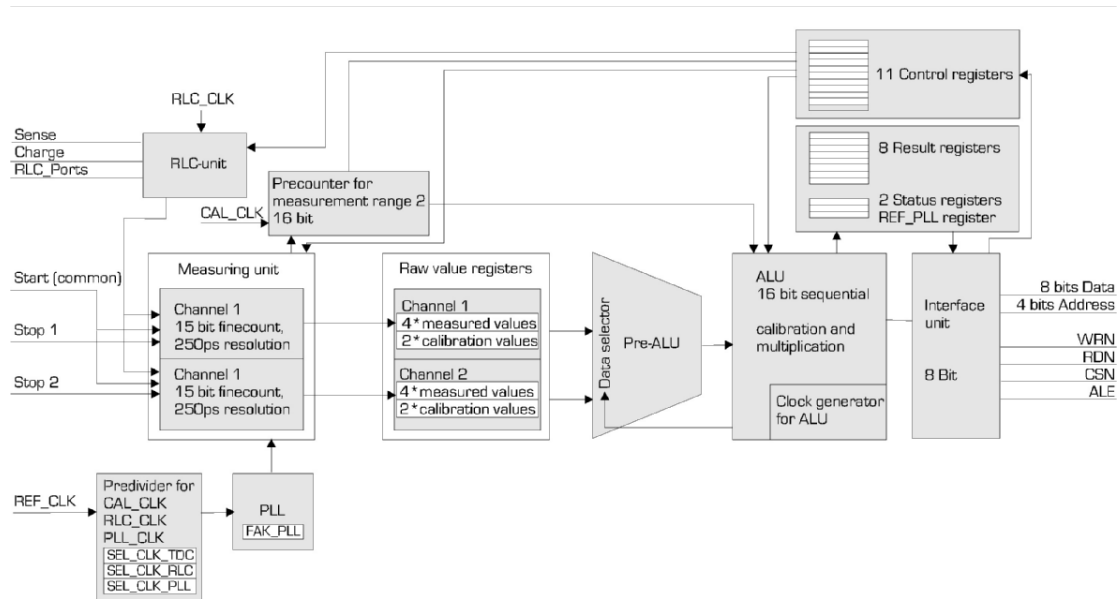
Mit diesen kann die Grenze der Auflösung durch den Herstellungsprozess umgangen werden, indem die relative Zeitdifferenz der Laufzeiten von zwei Gattern zur feineren Quantisierung verwendet wird, so können Auflösungen weit unter den Gatterlaufzeiten erreicht werden (10-15ps). Ihr Nachteil ist jedoch eine schlechtere Doppelpulsauflösung, d.h. es können nicht so schnell mehrere Ereignisse untereinander vermessen werden wie bei einer absoluten Messung.

Der verwendete GP1 nutzt absolute Laufzeiten zur Zeitmessung, er hat verschiedene Messmodi und eine 8-bit Rechnerschnittstelle, Abbildung 3.8 auf der nächsten Seite zeigt das Prinzipschaltbild des Bausteins (Acam Messelectronic GmbH, 2001, S. 6). Um Zeitdifferenzen ohne minimales Zeitlimit vermessen zu können, muss der so genannte Resolution Adjust Modus verwendet werden. In diesem Messmodus gibt es kein Start Signal, es können nur Stop Signale untereinander vermessen werden, d.h. die erste detektierte Flanke wird in dieser Anwendung als Start interpretiert und es wird die Differenz zur nächsten Flanke vermessen. Dieser Messmodus hat den Vorteil, dass die Auflösung quarzgenau und auch temperaturstabil eingestellt werden kann. Da mit einer PLL die Core-Spannung des Bausteins so eingestellt wird, dass die in einem Register eingestellte Auflösung exakt erreicht und gehalten wird (vgl. Acam Messelectronic GmbH, 2001, S. 24). Abbildung 3.9 auf der nächsten Seite zeigt das Prinzip der äußeren Beschaltung.

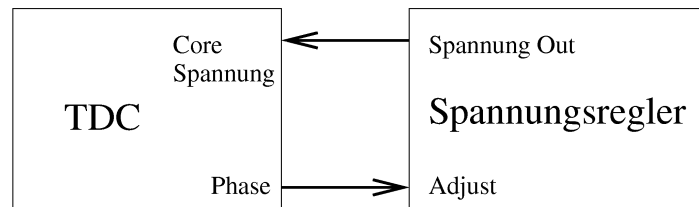
### 3.3.2 Kontroller und Schnittstelle

Zur Steuerung der TDC's und zum Transfer der Messdaten wird ein EZ-USB AN2131 Controller (vgl. Cypress Semiconductor, 2002b) verwendet. Er eignet sich sehr gut

<sup>7</sup>Phase Lock Loop



**Abbildung 3.8:** Prinzipschaltbild des GP1 (Acam Messelectronic GmbH, 2001, S. 6)



**Abbildung 3.9:** Prinzip der Core-Spannungs Regelung

für diese Anwendung, da er eine USB<sup>8</sup>-Schnittstelle enthält, einen 8051 kompatiblen Microprozessor beinhaltet, der in der Version QC den Adress- und Datenbus nach außen geführt hat und RAM<sup>9</sup> basiert arbeitet.

RAM basiert bedeutet in diesem Zusammenhang, dass der gesamte Programmcode im RAM gespeichert wird. Dies hat den Vorteil, dass sehr leicht Programmänderungen und Updates durchgeführt werden können und vereinfacht damit speziell die Entwicklung eines Prototypen. Eine Funktion des Controllers, von Cypress als ReNumeration (vgl. Cypress Semiconductor, 2002b, S.29) bezeichnet, erlaubt es dem Controller außerdem beim Verbinden mit einem USB Host sich als USB Peripherie zu melden, danach einen Firmware-Upload durchzuführen und sich anschließend als neues, in der Firmware definiertes, USB Gerät beim Host erneut zu registrieren. Dies kann bei jedem Verbinden des Zeitmessmoduls mit dem PC automatisch ausgeführt werden und ermöglicht eine sehr flexible Konfiguration der Hardware.

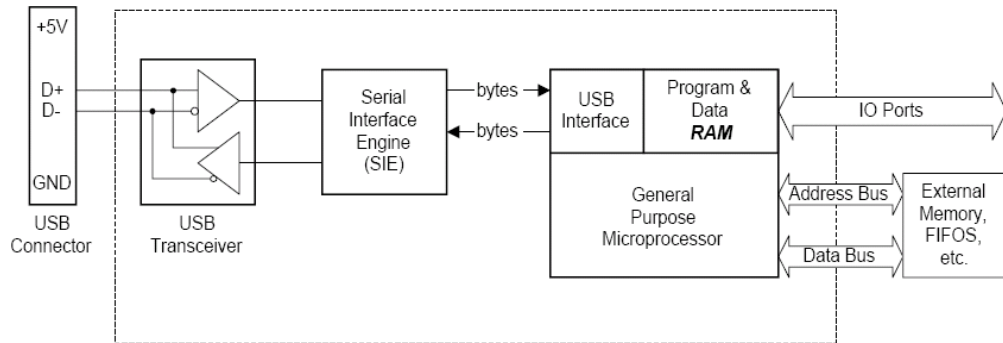
Der Controller arbeitet mit  $24\text{MHz}$  und hat  $8\text{kB}$  RAM, Abbildung 3.10 auf der nächsten Seite entnommen aus dem Datenblatt zeigt ein vereinfachtes Blockschaltbild. Ein USB-Transceiver verbindet darin den USB-Bus mit einer SIE<sup>10</sup>, welche

<sup>8</sup>Universal Serial Bus

<sup>9</sup>Random Access Memory

<sup>10</sup>Serial Interface Engine

die seriellen Daten kodiert und dekodiert. Sie führt auch die Fehlerkorrektur durch und alle anderen für USB notwendigen Mechanismen. Über ein USB-Interface hat der 8051 dann Zugriff auf den USB-Bus. Da viele Funktionen der USB Logik direkt in der Hardware implementiert sind, vereinfacht sich die USB Programmierung mit dem 8051. Für die Programmierung des EZ-USB sind trotzdem USB Grundlagen erforder-

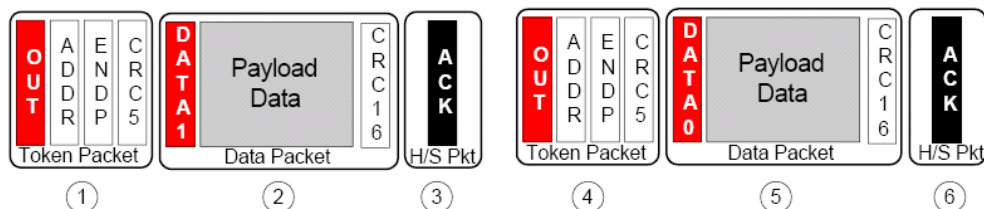


**Abbildung 3.10:** Blockschaltbild des AN2131QC (Cypress Semiconductor, 2002b, S.21)

lich, schon die USB Spezifikationen<sup>11</sup> zeigen die Komplexität dieses Bussystems.

Ein USB Datentransfer besteht aus verschiedenen Paketttypen die durch sog. PIDs<sup>12</sup> unterschieden werden. Es gibt vier PID Typen mit entsprechenden PID Namen, Tabelle 3.1 auf der nächsten Seite zeigt diese. Um eine Datenquelle oder -senke zu adressieren, werden sog. Endpoints verwendet. Man spricht von In-Endpoints bei Datentransfers zum Host und Out-Endpoints zur Peripherie, wobei es dabei wieder verschiedene Endpointtypen (oder Transfertypen) gibt. In dieser Anwendung wird der sog. Bulk Transfer verwendet, der eine feste Paketgröße verwendet.

Wichtig für das Verständnis ist die Tatsache, dass der USB-Host von dem es nur einen im Bussystem geben kann fast immer der Master ist<sup>13</sup>. Die USB-Geräte können nur auf Anfragen von diesem antworten. Um Daten an ein USB-Gerät zu senden, verwendet der USB-Host einen Out-Token (vgl. Tabelle 3.1 auf der nächsten Seite). Damit ein USB-Gerät überhaupt Daten an den Host senden kann, muss es für den entsprechenden Endpoint einen In-Token erhalten. Abbildung 3.11 zeigt ein Beispiel



**Abbildung 3.11:** Ein Beispiel für USB Pakete (Cypress Semiconductor, 2002b, S.22)

<sup>11</sup>Weitere Infos dazu unter: <http://www.usb.org>

<sup>12</sup>Packet Identifikation

<sup>13</sup>Eine Ausnahme ist z.B. der Stromsparmmodus.

eines Out-Transfers. Paket eins ist ein Out-Token, angezeigt durch einen Out PID. In Paket zwei sind dann Daten enthalten (Data PID). Paket drei ist ein Handshake Paket, wobei mit einem Acknowledge (Ack PID) das USB Gerät dem Host anzeigt, dass die Daten fehlerfrei empfangen wurden. Mit Paket vier beginnt eine neue Transaktion.

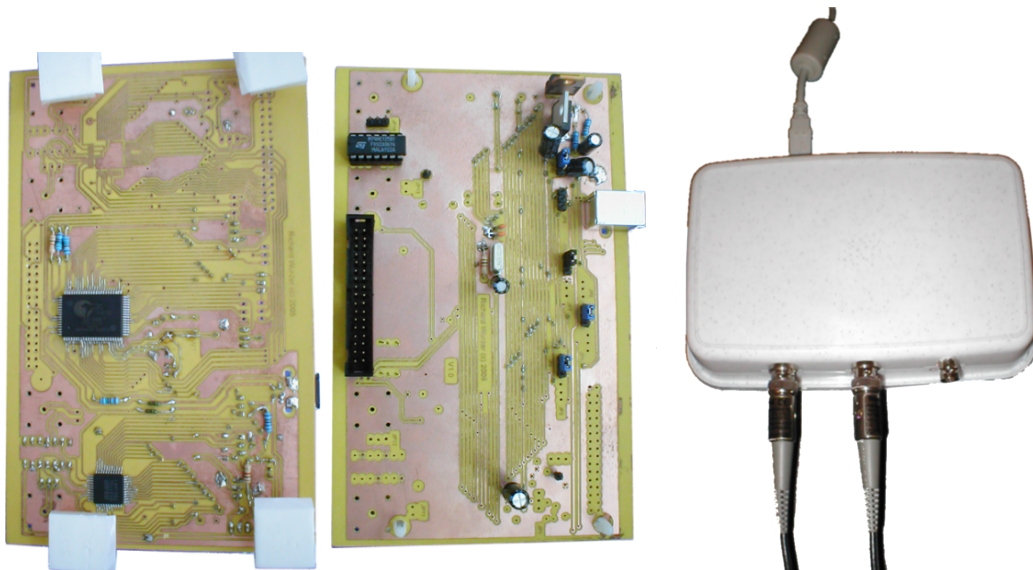
Für Details sei hier nur auf die USB-Spezifikation (siehe oben) verwiesen.

| PID Typ   | PID Name            |
|-----------|---------------------|
| Token     | In, Out, Sof, Setup |
| Data      | Data0, Data1        |
| Handshake | Ack,Nak,Stall       |
| Special   | Pre                 |

**Tabelle 3.1:** USB Paket Identifikationstypen

### 3.3.3 Praktische Realisierung

Der erste Experimentator des Zeitmessmoduls besteht aus zwei GP1 TDCs und einem EZ-USB Microcontroller (Abbildung 3.12). Als Programmiersprache für den EZ-USB wurde C gewählt, als Compiler wurde der SDCC<sup>14</sup> verwendet, da dieser Freeware ist. Abbildung 3.13 auf der nächsten Seite zeigt ein grobes Flussdiagramm der Firmware.

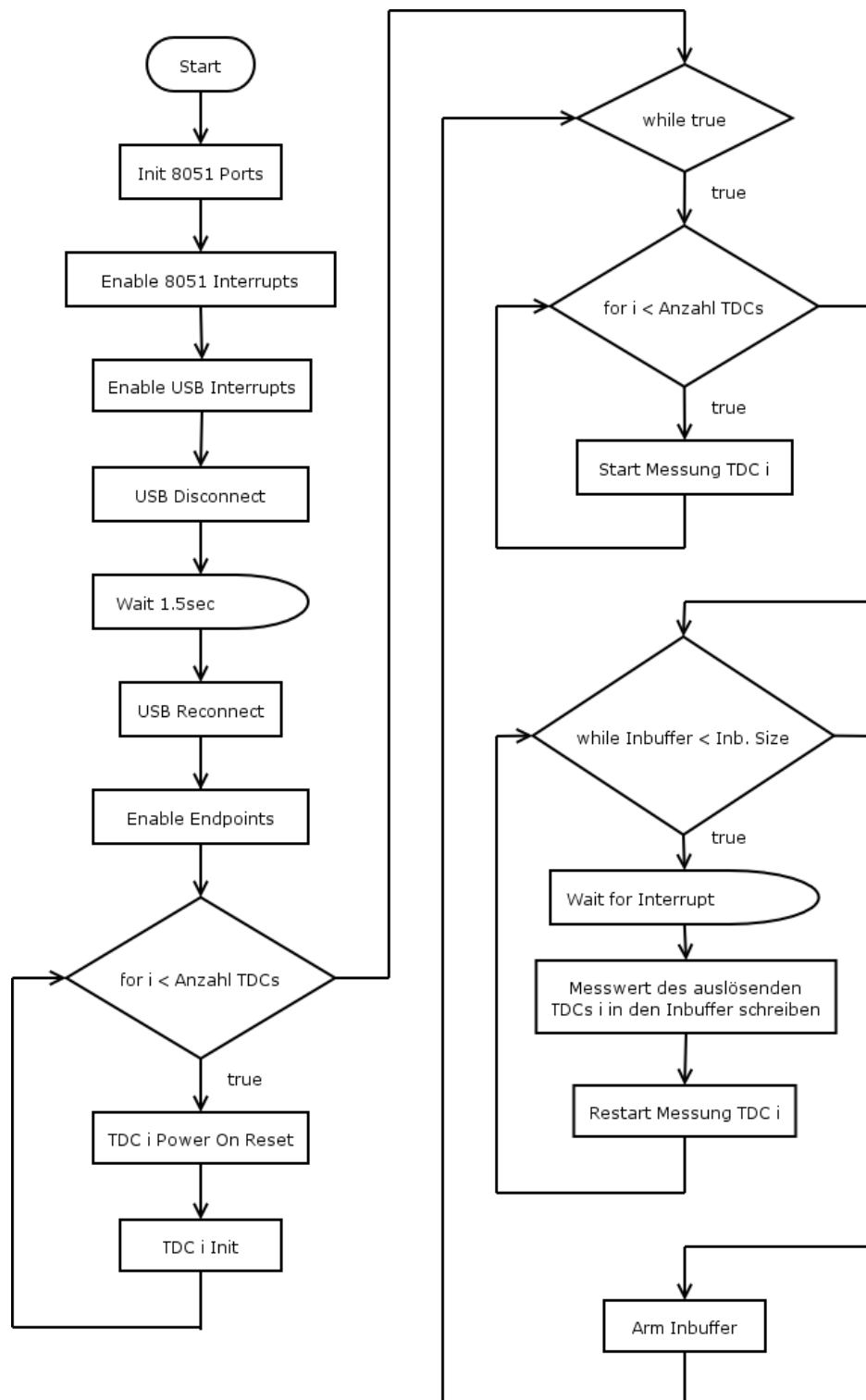


(a) Schaltungslayout (halbfertig)

(b) Experimentator mit Tastköpfen und USB-Kabel

**Abbildung 3.12:** Experimentator des Zeitmessmoduls

<sup>14</sup>Weitere Infos dazu unter: <http://sdcc.sourceforge.net>



**Abbildung 3.13:** Grobes Flussdiagramm der EZ-USB Firmware



## 3.4 PC-Software

### 3.4.1 Softwareanforderungen

Die Host-Software (die Software am PC) sollte folgende Module enthalten, wobei die mit \* gekennzeichneten Punkte bereits implementiert wurden. Die mit \*\* gekennzeichnete Punkte wurden teilweise implementiert.

#### 3.4.1.1 Kommunikation mit der Hardware

Die erfassten Daten der Messeinheit müssen vom PC empfangen und ausgewertet werden können, die Hardware soll über die Host-Software konfigurierbar sein. Folgende Funktionen müssen enthalten sein:

- USB-Schnittstelle/Treiber \*
- Kommunikationsprotokoll \*
- Firmware-Upload zur Hardware \*

#### 3.4.1.2 Benutzeroberfläche-GUI

Die Host-Software soll dem Benutzer über eine grafische Benutzeroberfläche (GUI<sup>15</sup>) die Konfiguration des Systems erlauben und alle relevanten Informationen und Ergebnisse darstellen. Folgend werden wichtige Funktionalitäten aufgelistet:

#### Konfiguration

- Hardwarekonfiguration, welche und wieviele Messkanäle sollen verwendet werden. \*\*
- Kalibrieren des Systems, evtl. ein Assistent der durch die notwendigen Punkte führt.
- Räumliche Gegebenheiten (2D, 3D), Eingabemöglichkeit der relevanten Daten (Positionen der Empfänger, Wände, evtl. andere Objekte) durch Koordinatenangaben. \*\*
- Hardwaretests, Testroutine mit der die Funktion der Hardware geprüft werden kann.
- Speichern/Laden von Einstellungen und Messungen. \*\*

---

<sup>15</sup>Graphical User Interface

## Ergebnisdarstellung und Information

- Aktuelle Einstellungen anzeigen \*
- Empfangene Rohdaten anzeigen (pro Kanal) \*
- Messwerte anzeigen (pro Kanal) \*
- Berechnete Werte darstellen \*
- Mittelwerte und Fehler anzeigen (pro Kanal) \*\*
- Aktuelle Messraten darstellen \*\*
- Positionsgrafiken (evtl. Bewegungsanimationen) \*\*
- Statistische Auswertungen (evtl. grafisch)
- Zeitreihen erstellen (Daten, Position)

### 3.4.1.3 Auswertung der Messdaten

Die Host-Software berechnet aus den von der Messeinheit gewonnen Daten Positionen. Wichtige Funktionen dabei sind:

- Berechnung der Position \*
- Fehlererkennung/Fehlerkorrektur
- Statistische Messwertverbesserung (z.B. durch Mittelwertbildung) \*\*

**Entwicklungstools** Zur Erleichterung der Entwicklung soll zusätzliche Funktionalität enthalten sein:

- Simulation von Daten \*
- manuell Befehle an die Hardware senden
- Bustests
- zusätzliche Hardwaretests

**Datenexport** Damit die gemessenen Daten weiterverwendet werden können, soll die Möglichkeit bestehen, die Messdaten aufzuzeichnen und zu exportieren, dies kann erfolgen durch:

- Datenbankanbindung (z.B. SQL ..)
- Fileexport (z.B. Matlab, Excel ...) \*

### 3.4.2 Praktische Realisierung

Da Microsoft Windows ein derzeit viel genutztes Betriebssystem ist, soll die Anwendung unter diesem Betriebssystem arbeiten. Um die Anwendung auch in zukünftigen Microsoft Betriebssystemen möglichst gut weiterentwickeln zu können, wird die aktuelle .NET<sup>16</sup> Technologie mit der Programmiersprache C# verwendet.

#### 3.4.2.1 Windows Treiber

Da im Lieferumfang des EZ-USB Developmentkits (vgl. Cypress Semiconductor, 2002a) ein fertiger Treiber mit API-Funktionen für Bulk-Endpoints enthalten ist (vgl. Cypress Semiconductor, 1999), wird dieser für eine erste Version verwendet, da damit die Entwicklung eines eigenen Treibers wegfällt. Dieser Treiber kann nur mit einem Gerät gleichzeitig kommunizieren, was für diese Anwendung aber vollkommen ausreichend ist.

Um jedem USB Gerät einen Treiber eindeutig zuzuordnen, wird eine Kombination aus VID<sup>17</sup> und PID<sup>18</sup> verwendet. Das Gerät teilt diese dem Betriebssystem über den sog. Device Descriptor mit. Findet das System in der Registry keinen passenden Treiber zu dieser Gerätebeschreibung, so kann über eine sog. INF-Datei dem Gerät ein Treiber zugeordnet werden. Abbildung 3.14 zeigt einen Ausschnitt aus der verwendeten Gerätebeschreibungsdatei, wobei damit dem Gerät nach der ReNumeration (vgl. Abschnitt 3.3.2) der gleiche Treiber wie vorher zugeordnet wird, lediglich der Name ändert sich. In Abbildung 3.15 auf der nächsten Seite ist zu sehen,

```
[Version]
Signature="$CHICAGO$"
Class=USB
provider=%Cypress%
LayoutFile=layout.inf

[Manufacturer]
%Cypress%=Cypress

[Cypress]
; Mit dem folgenden PID meldet sich der AN2131 bevor er Firmware geladen hat.
%USB\VID_0547&PID_2131.DeviceDesc%=EZUSB.Dev, USB\VID_0547&PID_2131

;Der in der Firmware gesetzte PID, ihm wird auch der gleiche Treiber zugewiesen.
%USB\VID_0547&PID_1002.DeviceDesc%=EZUSB.Dev, USB\VID_0547&PID_1002

...
...

[Strings]
Cypress="Cypress Semiconductor"
USB\VID_0547&PID_2131.DeviceDesc="Cypress EZ-USB (2131Q/2131S/2135S) - EEPROM missing"
USB\VID_0547&PID_1002.DeviceDesc="Diplomarbeit Zeitmessung"

EZUSB.SvcDesc="Cypress General Purpose USB Driver (ezusb.sys)"
```

**Abbildung 3.14:** Ausschnitt aus der Gerätebeschreibungsdatei zeitmessung.inf

<sup>16</sup>Weitere Infos dazu unter: <http://www.microsoft.com/net/>

<sup>17</sup>Vendor ID

<sup>18</sup>Product ID

dass dem Zeitmessmodul der neue Gerätenamen zugeordnet wurde. Da die API-Aufrufe



**Abbildung 3.15:** Gerätemanager mit dem Zeitmessmodul als USB-Gerät

des Treibers in C erfolgen, werden diese der Anwendung über DLL<sup>19</sup>-Aufrufe zur Verfügung gestellt, für Details sei hier nur auf (Schäpers u. a., 2004, S. 1069ff) und (Wigard, 2004, S. 531ff) verwiesen.

### 3.4.2.2 Kommunikation mit der Hardware

In einer ersten Version wurde ein sehr einfacher Ansatz gewählt, dabei findet nur eine einseitige Kommunikation von der Zeitmessung zum Host statt, da eventuelle Übertragungsfehler automatisch vom USB-Bus korrigiert werden. Eine dynamische Konfiguration der Hardware ist dabei trotzdem über die Firmware und ReNumeration möglich (vgl. Abschnitt 3.3.2). Abbildung 3.16 zeigt den Aufbau des sehr einfachen Protokolls. Das erste Byte zeigt dabei an von welchem TDC die folgenden Messdaten stammen. Die letzten zwei Bytes geben den Status der Messung an (z.B. ob die Messung erfolgreich war, ein Timeout stattgefunden hat oder ob die PLL eingerastet ist).

|           |             |             |             |             |              |              |
|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| Kanal Nr. | Datenbyte 1 | Datenbyte 2 | Datenbyte 3 | Datenbyte 4 | Statusbyte 1 | Statusbyte 2 |
| b1        | b2          | b3          | b4          | b5          | b6           | b7           |

**Abbildung 3.16:** Kommunikationsprotokoll zwischen Zeitmessung und Host

### 3.4.2.3 Positionsberechnung

Das in Abschnitt 3.2.1 erarbeitete Verfahren muss für jede Positionsberechnung solange angewendet werden, bis sich die Lösung  $\mathbf{x}_k$  innerhalb einer gewünschten Rechengenauigkeit nicht mehr ändert, oder eine maximale Anzahl von Iterationen erreicht ist.

<sup>19</sup>Dynamik Link Library

Für die Implementierung in C# wurde zur Matrizen-Verarbeitung eine Portierung der Bibliothek JAMA<sup>20</sup> verwendet. Ist das Gleichungssystem singulär wird unterbrochen bis andere Messwerte vorhanden sind.

Um qualitativ zu zeigen, dass die Lösung schnell konvergiert wurde eine Laufzeitdifferenz  $\Delta t_{ab}$  von  $10ns$  und  $\Delta t_{ac}$  von  $0ns$  angenommen und ein Dreieck mit  $c = 30m$ ,  $b_y = 30m$  und  $b_x = 15m$  gewählt. In Tabelle 3.2 ist die Strecke  $s_b$ , ihre Änderung und die Euklidische-Norm  $\|\epsilon\|$  des Änderungsvektors des gesamten Gleichungssystems dargestellt. Schon nach drei Iterationen tritt nur noch eine Änderung von  $4.5E-5$  auf. Dies entspricht einer Abweichung von ca.  $0.05mm$ , d.h. man kann hier schon unbedenklich nach drei Schritten abbrechen.

| $k$ | $s_b$              | $\Delta s_b$           | $\ \epsilon\ $         |
|-----|--------------------|------------------------|------------------------|
| 0   | 18.75              | 2.0610206461718503     | 2.4624307943027066     |
| 1   | 16.68897935382815  | -0.05915014341732154   | 0.10389546004238706    |
| 2   | 16.748129497245472 | -4.5054319321271735E-5 | 1.1007865229802604E-4  |
| 3   | 16.748174551564794 | -2.235377563007506E-9  | 3.9895201696234E-9     |
| 4   | 16.748174553800173 | -8.131307576718867E-16 | 1.4994411557495109E-15 |

**Tabelle 3.2:** Beispiel für die Konvergenz des Newton Verfahrens für das nichtlineare Gleichungssystem

#### 3.4.2.4 Benutzeroberfläche-GUI

Die grafische Benutzeroberfläche wurde mit Visual Studio .NET gestaltet und programmiert. Es handelt sich dabei um eine multithreading Anwendung. Die einzelnen Aufgaben sind dabei in mehrere Ausführungsstränge aufgeteilt, d.h. die einzelnen Threads bekommen abwechselnd abhängig von ihrer Aufgabe Rechenzeit zugeteilt. Abbildung 3.17 auf der nächsten Seite zeigt einen Screenshot der Anwendung. Im Anhang A.1 des Textes ist eine kurze Installations- und Bedienungsanleitung enthalten.

<sup>20</sup>Weitere Infos dazu unter: <http://math.nist.gov/javanumerics/jama>

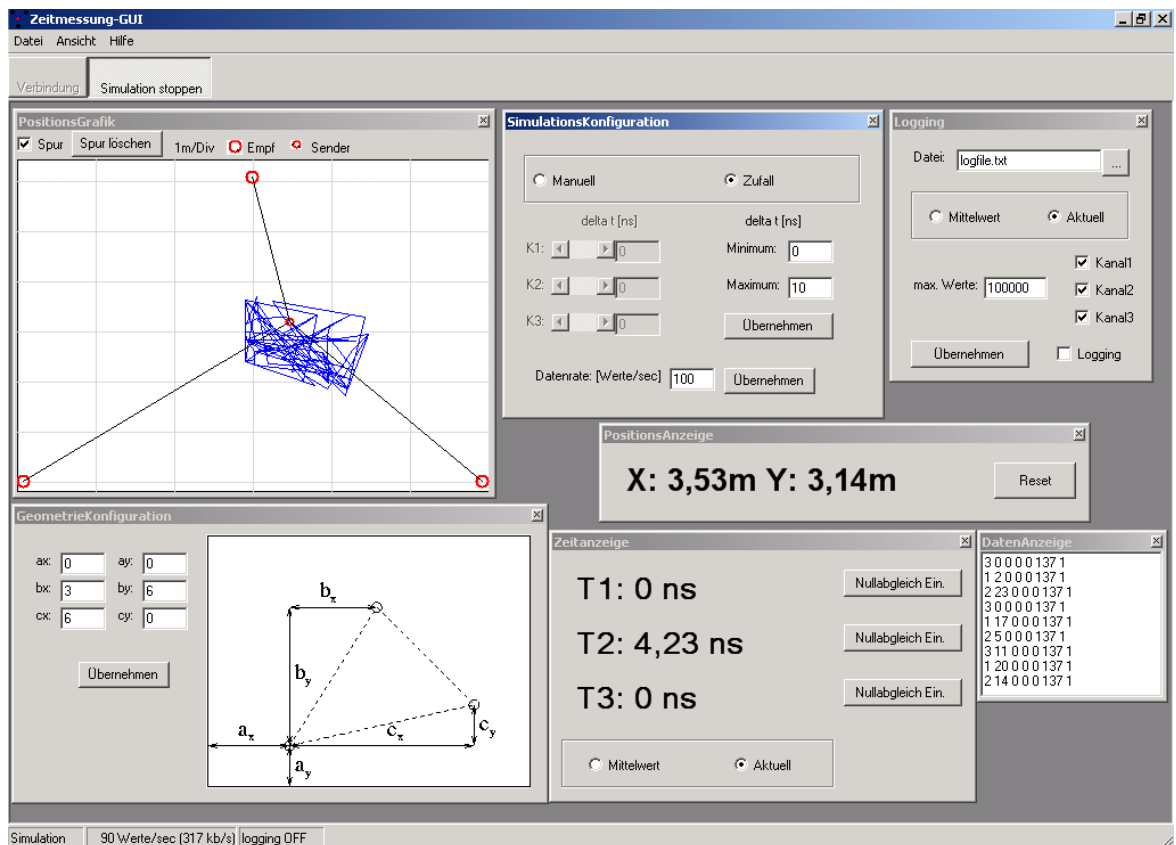


Abbildung 3.17: Ein Screenshot der Benutzeroberfläche

## 3.5 Sender und Empfänger

Dieser letzte Abschnitt des Systemkonzepts beschäftigt sich mit der Auswahl einer geeigneten Übertragungstechnologie für die Verwendung im hier vorgestellten System.

### 3.5.1 Ultraschall

Hier wird untersucht ob sich Ultraschall (US) zur Positionsbestimmung eignet.

#### 3.5.1.1 Grundlagen

Durch mechanische Kräfte kann man Masseteilchen in Schwingungen versetzen, diese breiten sich als Schallwelle in Stoffen aus. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $v_s$  (Schallgeschwindigkeit) in idealen Gasen ist durch Gleichung 3.18 gegeben, wobei  $\kappa$  der Adiabatenexponent ist,  $R$  ist die universelle Gaskonstante,  $T$  stellt die Temperatur in Kelvin dar und  $M$  ist die molare Masse.

$$v_s = \sqrt{\kappa \cdot \frac{R \cdot T}{M}} \quad (3.18)$$

$v_s$  beträgt in Luft bei 20° C ca. 343m/s . Der Effektivwert der Druckschwankungen in der Schallwelle wird als Schalldruck  $p$  bezeichnet. Er wird in Mikrobar  $\mu b$  oder Pascal  $Pa$  gemessen und oft logarithmisch angegeben. Gleichung 3.19 zeigt den Zusammenhang, wobei  $L$  dem Schalldruckpegel in  $dB$  entspricht und  $p_0$  einen Referenzschalldruck von  $20\mu Pa$  oder  $200\mu b$  darstellt (vgl. Beuth u. a., 2001, S. 178).

$$L = 20 \cdot \lg \frac{p}{p_0} \quad (3.19)$$

Von Ultraschall spricht man bei Frequenzen von mehr als  $16kHz$ . Er ist nicht wahrnehmbar, kann aber bei sehr großen Druckschwankungen das Muskel- und Nervensystem des Menschen schädigen (vgl. Beuth u. a., 2001, S. 173). Die geringe Ausbreitungsgeschwindigkeit  $v_s$  ist der Grund warum man mit Ultraschall viel einfacher Laufzeitmessungen durchführen kann, als mit elektromagnetischen Wellen. Für die Anwendung in Gebäuden ist ein möglicher Nachteil die gute Reflexion an Grenzflächen, wobei die Reflexionseigenschaften von der Frequenz und der Art des Werkstoffes abhängig sind (vgl. Hesser, 2003, S. 3). Eine Schallwelle wird in Luft bei der Ausbreitung durch zwei Effekte geschwächt:

- Geometrische Ausbreitung

Für eine genaue Berechnung der Ausbreitung sind viele Parameter wie Luftdichte, Ausbreitungsgeschwindigkeit und Wellenlänge zu berücksichtigen. Für einfache Abschätzungen kann idealisiert davon ausgegangen werden, dass der Schalldruck indirekt proportional zur Entfernung ist (Gleichung 3.20).  $A_s(r)$  ist ein Abschwächungsfaktor des Schalldruckes im Abstand  $r_0$  von der Schallquelle zum Radius  $r$  (vgl. Dijk, 2004, S. 19).

$$A_s(r) = \frac{r_0}{r} \quad (3.20)$$

- Energieabsorption der Luft

Die Absorption von Schallenergie in der Atmosphäre wird durch Wärmeleitung und andere molekulare Effekte hervorgerufen. Sie kann wieder in einem Abschwächungsfaktor  $A_a(r)$  (Gleichung 3.21) zusammengefasst werden. Wobei  $\alpha$  der Absorptionskoeffizient in  $dB/m$  ist. Er ist eine Funktion der Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Schallfrequenz und des Luftdrucks.

$$A_a(r) = 10^{-\frac{\alpha \cdot r}{20}} \quad (3.21)$$

Die Dämpfungen aus Gleichung 3.20 auf der vorherigen Seite und Gleichung 3.21 können nun zur Berechnung des maximalen Schalldrucks im Abstand  $r$  vom Referenzpunkt  $r_0$  mit dem Referenzschalldruck  $p_0$  verwendet werden (Gleichung 3.22) (vgl. Dijk, 2004, S. 21).

$$p_{max}(r, \alpha) = p_0 \cdot A_s(r) \cdot A_a(r, \alpha) \quad (3.22)$$

### 3.5.1.2 Ultraschallwandler

Um die Masseteilchen durch elektrische Energie in Bewegung zu versetzen, benötigt man einen elektroakustischen Wandler, der elektrische Energie in Schallenergie umwandelt. Zur Erzeugung von US wird dazu meist der piezoelektrische Effekt angewendet. Legt man an ein dünnes Plättchen aus ferroelektrischem Kristall oder Keramik eine elektrische Spannung, so ändert es seine Dicke. Umgekehrt bewirkt eine mechanische Verformung eine Änderung der elektrischen Ladung an der Oberfläche (vgl. Bauer, 2002, S. 5).

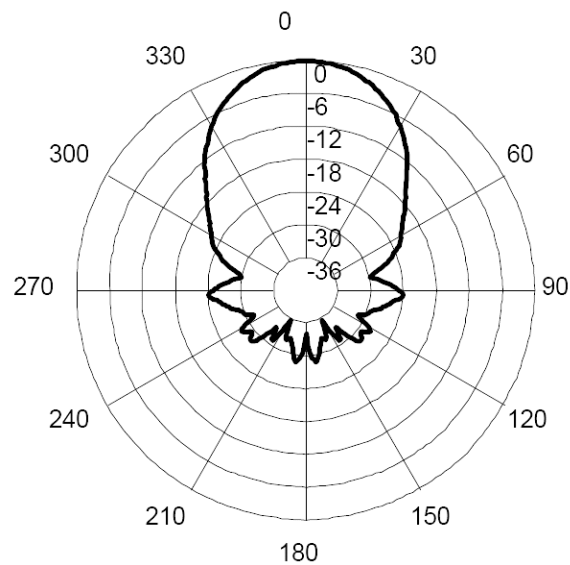
Folgend sollen wichtige Kriterien für die Auswahl eines geeigneten US-Wandlers betrachtet werden. Da die Hauptanwendungsgebiete von US Bildgebungssysteme für Festkörper in der Medizin und Industrie sind und dort die Eindringtiefe und auch die Ortsauflösung eine entscheidende Rolle spielen, arbeitet man dort mit Frequenzen im  $MHz$  Bereich (vgl. Bauer, 2002, S. 6). Für Abstandsmessungen in Luft ist aber die Dämpfung der einschränkende Faktor der Reichweite. Da die Dämpfung in Luft aber mit der Frequenz stark ansteigt, erhöht eine Verringerung der Frequenz die Reichweite (vgl. Lamancusa, 2000, S. 5). Zusätzlich ist bei der Auswahl eines Wandlers die beschränkte Spannungsversorgung eines mobilen Systems zu berücksichtigen.

Für Laborversuche wurden die US-Sender/Empfänger 400ST/R160 (Angus Technologie Limited, 2005) verwendet, Abbildung 3.18 auf der nächsten Seite zeigt ein Foto des Senders. Diese haben eine Mittenfrequenz von  $40kHz$  und eine  $6dB$  Bandbreite von ca.  $2kHz$ . Abbildung 3.19 auf der nächsten Seite zeigt die Richtcharakteristik, entnommen aus dem Datenblatt, der Wandler (vgl. Angus Technologie Limited, 2005). Dort kann man einen großen Nachteil einer US Lösung sehen, um eine zweidimensionale Abdeckung von  $360^\circ$  mit maximal  $-6dB$  zu erreichen würde man mindestens sechs Wandler pro Sender benötigen. Der US-Sender erreicht bei  $10V_{eff}$  und  $40kHz$  in einem Abstand  $r$  von  $30cm$  laut Datenblatt (vgl. Angus Technologie Limited, 2005) einen maximalen Schalldruck  $p_{max}$  von  $125dB$ . Mit  $\alpha \approx 1.3$  bei  $20^\circ C$  und einer Luftfeuchtigkeit von  $50\%$  (vgl. Dijk, 2004, S. 34) erhält man aus Gleichung 3.22 den in Abbildung 3.20 auf Seite 42 dargestellten maximalen Schalldruck  $p_{max}(r, \alpha)$ . Der US-Empfänger hat laut Datenblatt (vgl. Angus Technologie Limited, 2005) bei  $40kHz$





**Abbildung 3.18:** Foto des verwendeten US-Senders



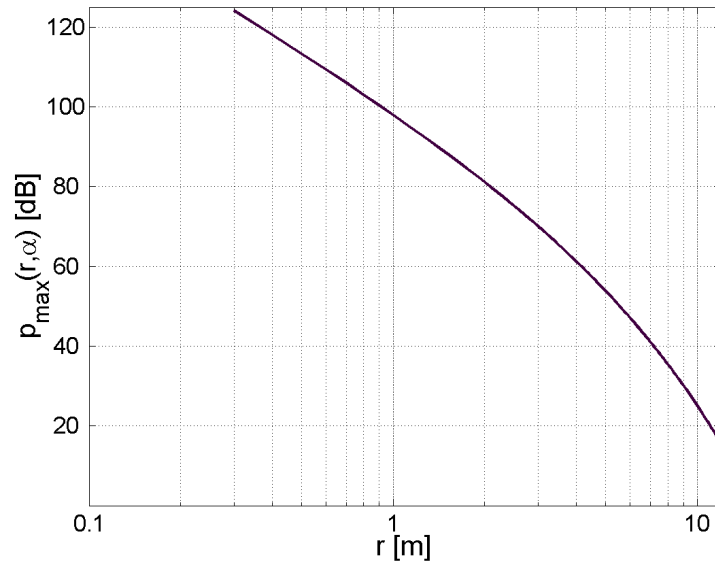
**Abbildung 3.19:** Richtcharakteristik 400ST/R160 bei 40kHz (Angus Technologie Limited, 2005, S. 1)

eine Empfindlichkeit von  $1\text{mV}/\text{bar}$ , damit ergibt sich z.B. in einem Abstand von ca.  $90\text{cm}$  eine maximale Amplitude von  $20\text{mV}$ . Aus Abbildung 3.20 auf der nächsten Seite ist damit auch ersichtlich, dass die Reichweite auf wenige Meter begrenzt ist. Da bei Entfernungen größer als ca.  $10\text{m}$  der empfangene Schalldruck zu klein wird, um ein Signal zuverlässig zu detektieren.

Um eine Gehörschädigung zu vermeiden wird von verschiedenen Organisationen für  $40\text{kHz}$  US ein zulässiger Schalldruckpegel von  $100 - 110\text{dB}$  angegeben, wobei dieser Pegel den maximalen Wert für eine tägliche acht Stunden Belastung darstellt (vgl. Dijk, 2004, S.40). Damit dieser Wert nicht überschritten wird, wurde bei dem nachfolgenden Experiment nicht mit  $10V_{\text{eff}}$  gearbeitet, sondern eine kleinere Spannung verwendet.

### 3.5.1.3 Experiment

Da in der Applikationsbeschreibung (Raju, 2001) zur Distanzmessung mit  $40\text{kHz}$  Keramik Ultraschallwandlern das Senden von Rechteckpulspaketen empfohlen wird,



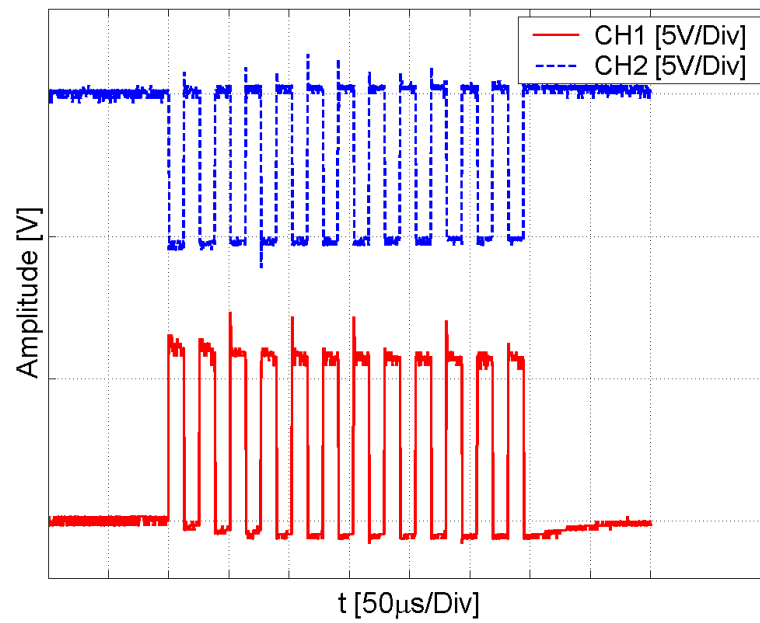
**Abbildung 3.20:** Berechneter maximaler Schalldruck  $p_{\max}$  des verwendeten US-Senders bei  $\alpha = 1.3$  in Abhängigkeit der Entfernung  $r$ .

wurden solche Signale mit einem Mikrocontroller erzeugt (siehe Abbildung 3.21 auf der nächsten Seite). Als Treiber für den Wandler wurden parallel geschaltete Inverterbausteine (SN74LS04) verwendet. Kanal 1 wurde als positiver Eingang und Kanal 2 als negativer Eingang für den Wandler verwendet. So konnte eine Spannung von  $10V_{SS}$  erreicht werden. Abbildung 3.22 auf der nächsten Seite (Kanal 2) zeigt das unverstärkte Empfangssignal in ca. 50cm Entfernung. Um die Laufzeit zu bestimmen, kann nach der Verstärkung des Signals z.B. ein Komparator eingesetzt werden, um einen beim Senden der Rechteckpulse gestarteten Timer zu stoppen, um damit dann die Laufzeit des Pulses zu erhalten. Eine genauere Auswertung ist mit einer A/D<sup>21</sup>-Wandlung und anschließender Spitzenwertdetektion möglich.

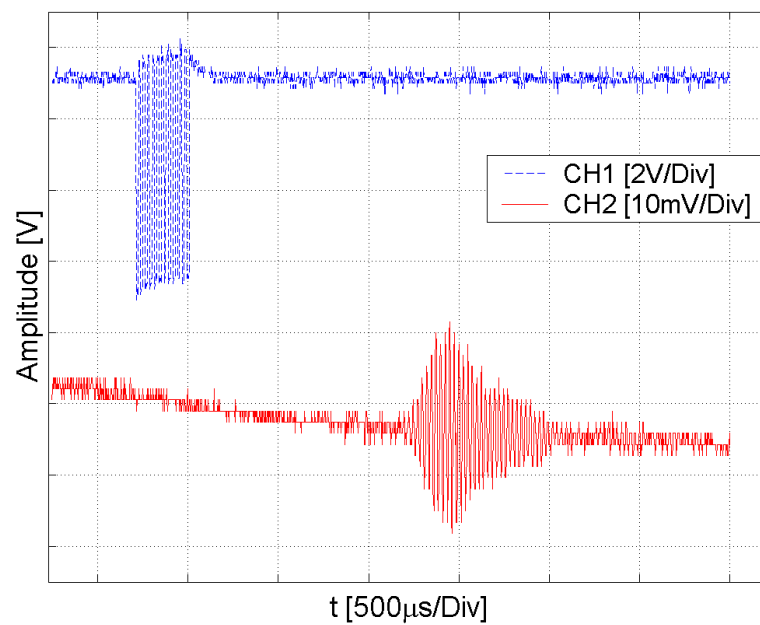
Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass US durchaus verwendet werden kann. Der Vorteil dabei ist die sehr einfache technische Realisierbarkeit der Hardware durch die geringe Ausbreitungsgeschwindigkeit. Bei einer realen Anwendung ist jedoch der notwendige Sichtkontakt zwischen den Sendern und Empfängern ein Problem. Für Anwendungen im Bereich der Robotik oder Ähnlichem ist dies durchaus akzeptabel, die Platzierung der US-Wandler an Personen stellt aber ein Problem dar. Ein weiterer Nachteil ist auch die geringe Reichweite, welche in größeren Räumen die Montage von vielen Empfängern erfordert.

---

<sup>21</sup> Analog/Digital



**Abbildung 3.21:** Oszilloskopbild der gesendeten Rechteckpulspakete



**Abbildung 3.22:** Oszilloskopbild des Sende- und Empfangssignals (in ca. 50cm Entfernung)

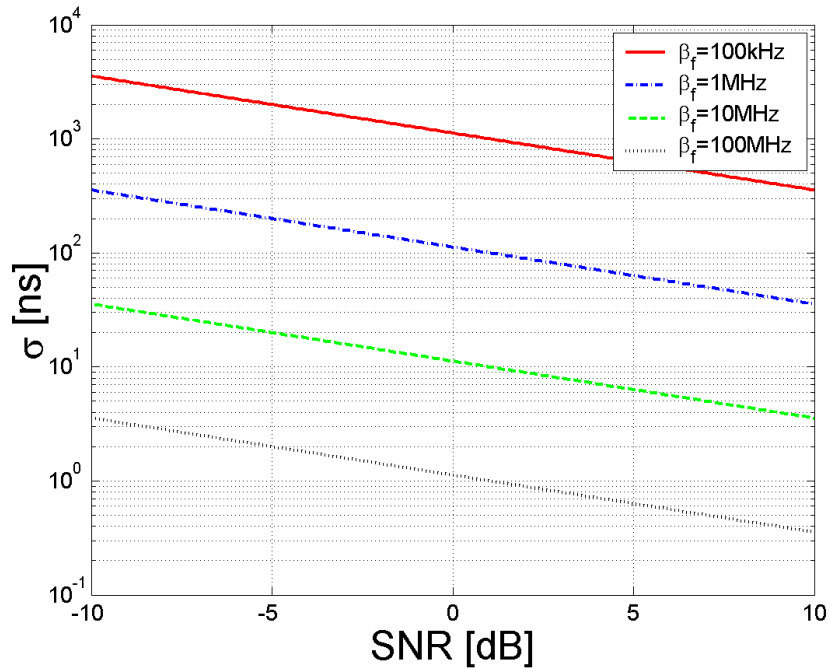
### 3.5.2 Funk

Die Suche nach einer geeigneten Sender-/Empfängerkombination hat sich als nicht trivial herausgestellt. Selbst die Definition der Anforderungen an ein solches System ist nicht einfach, da für die Übertragung von so kleinen Zeitdifferenzen, im Bereich weniger  $ns$ , sehr steile Flanken notwendig sind. Erst durch sehr hohe Bandbreiten, im Bereich mehrerer hundert  $MHz$ , können diese erreicht werden.

In einer reflexionsfreien Umgebung, in einem reinen Gauß-Kanal, kann die informationstheoretische obere Grenze für die erreichbare Genauigkeit mit der Cramer-Rao Schranke angegeben werden. Die Varianz  $\sigma^2$  der Laufzeit, also der mittlere Fehler, ist durch die Schranke

$$\sigma^2 \geq \frac{1}{8\pi^2 \cdot \beta_f^2 \cdot SNR} \quad (3.23)$$

nach unten begrenzt (Chung und Ha, 2003, S. 390). D.h. diese Fehlerschranke kann nicht unterschritten werden. Abbildung 3.23 zeigt den Zusammenhang zwischen SNR und der Standardabweichung  $\sigma$  für verschiedene Bandbreiten  $\beta_f$ . Um diese hohen



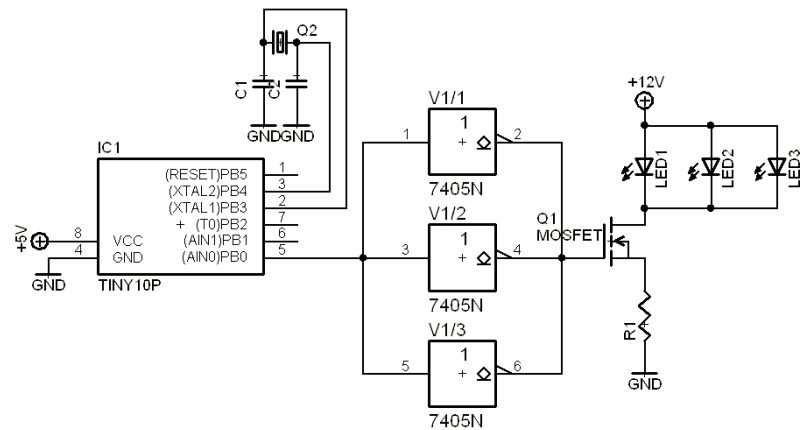
**Abbildung 3.23:** Cramer-Rao Schranke für verschiedene Bandbreiten

Bandbreiten zu erreichen, sind spezielle Technologien mit effizienten Antennen erforderlich. Da aber Untersuchungen dahingehend den Rahmen dieser Arbeit sprengen, wurde der Entwurf eines solchen Systems nicht weiterverfolgt. Grundsätzlich sollten aber, damit ein fertiges System auch tatsächlich benutzt werden darf, nur Sender verwendet werden, die in einem lizenzfreien Funkfrequenzband arbeiten.<sup>22</sup>

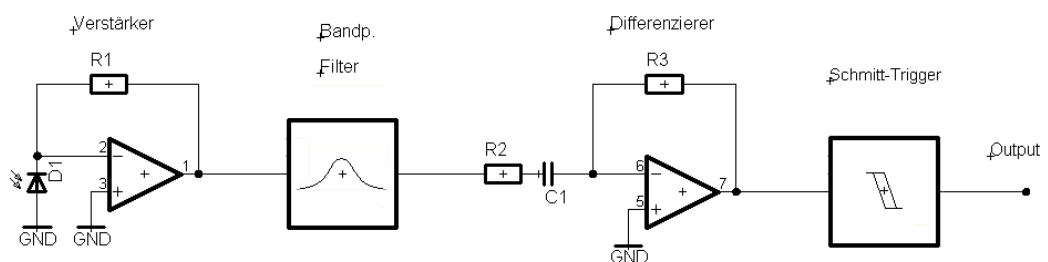
<sup>22</sup>Für Details sei hier nur auf die derzeit gültige Fassung des österreichischen Telekommunikationsgesetzes TKG 2003 und den dazugehörigen Frequenznutzungsplan (BMVIT, 2003) verwiesen.

### 3.5.3 Infrarot

Bei der Positionsbestimmung mit Infrarot (IR) ergeben sich ähnliche Probleme wie bei Funk und Ultraschall. Durch die von Infrarot Emitterdioden abgestrahlte Wellenlänge im  $nm^{23}$ -Bereich sind zwar theoretisch sehr hohe Bandbreiten möglich, die einschränkende Faktoren der möglichen Modulationsbandbreite sind jedoch die Anstiegszeiten der Sendedioden. Bei handelsüblichen Emitterdioden liegen diese im Bereich von  $0.5\mu s$ , womit sich maximale Bandbreiten von ca.  $1MHz$  ergeben. Damit sind nach Gleichung 3.23 auf der vorherigen Seite zwar theoretisch Genauigkeiten bis in den  $ns$ -Bereich möglich, bei der praktischen Realisierung ändern sich jedoch mit sinkendem Empfangspegel die Triggerzeitpunkte der Zeitmessung. Zusätzlich werden diese durch Rauschen verschoben. Das Problem des sinkenden Pegels kann mit einer Maximumdetektion durch Differenzierung und anschließender Nulldurchgangsdetektion umgangen werden (Abbildung 3.24(b)). Damit keine Störungen differenziert werden und Rauschen im Nullpunkt unterdrückt wird, muss ein guter Filter eingesetzt werden.



(a) Sendeschaltung



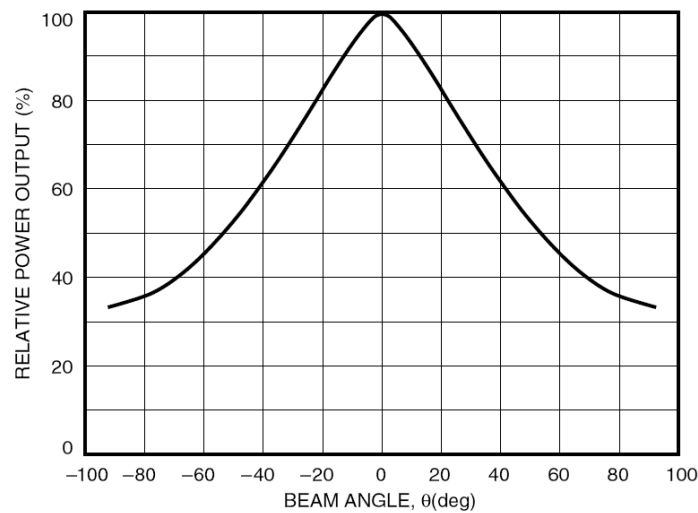
(b) Empfängerschaltung

Abbildung 3.24: Einfache IR-Datenübertragung

<sup>23</sup>Nanometer

Die schon von Ultraschall bekannten Probleme (Abschnitt 3.5.1) treffen auch auf IR zu. Für eine volle zweidimensionale Abdeckung müssen, abhängig von den verwendeten Dioden, ebenfalls mehrere im Kreis angeordnet werden. Abbildung 3.25 zeigt die Richtcharakteristik des verwendeten IR-Emitters OD-100, entnommen aus dem Datenblatt (Opto Diode Corp., 2004, S. 2). Durch Pulsen mit großen Strömen kann damit auch in größeren Räumen eine  $360^\circ$  Abdeckung erreicht werden, für einen batteriebetriebenen Sender ist diese Methode jedoch schlecht geeignet. Zusätzlich ist bei IR wie bei US eine Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger notwendig.

In einem Experiment wurde die OD-100 Diode (vgl. Opto Diode Corp., 2004) mit einem schnellen MOSFET<sup>24</sup> OOK<sup>25</sup> moduliert. Mit der einfachen Sender-/Empfängerkombination, nach Abbildung 3.24 auf der vorherigen Seite, konnte die notwendige Genauigkeit von ca.  $1ns$  jedoch nicht erreicht werden.



**Abbildung 3.25:** Richtcharakteristik des verwendeten Emitters (Opto Diode Corp., 2004, S. 2)

<sup>24</sup>Metal Oxid Semiconductor Field Effect Transistor

<sup>25</sup>On Off Keying

# Kapitel 4

## Messungen und Ergebnisse

### 4.1 Zeitmessungen

Dieser Abschnitt prüft qualitativ die Genauigkeit und Auflösung der Zeitmessung um festzustellen, ob diese den Anforderungen dieser Anwendung genügt. Dazu sollen die Begriffe Auflösung und Genauigkeit in diesem Kontext zunächst genauer definiert werden. Die maximale Auflösung ist hier die kleinste digitale Quantisierungsstufe der Zeitmessung, d.h. ein Bit. Die Genauigkeit ist ein Maß für den Fehler der bei einer Messung unvermeidbar gemacht wird, er wird durch verschiedene Fehlerquellen wie Rauschen, systematische Fehler oder Offsetfehler verursacht. Für die Summe dieser Fehler wird im Datenblatt des TDC für den hier verwendeten Modus<sup>1</sup> ca. 1,1 LSB<sup>2</sup> angegeben, dies entspricht ca. einem Fehler von  $280ps$  (vgl. Acam Messelectronic GmbH, 2001, S. 50).

Die Genauigkeit des Zeitmessmoduls wird voraussichtlich nicht der im Datenblatt des GP1 angegebenen entsprechen, da sich noch zusätzliche Störeinflüsse durch das nicht perfekte Schaltungslayout und die Eingangspuffer ergeben. Beispiele für Fehlerquellen können die Regelung der Spannungsversorgung oder das Nebensprechen anderer Signale wie des USB-Buses sein.

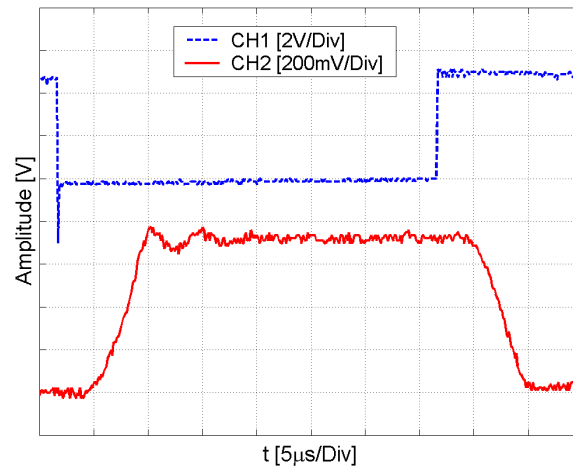
Um die Genauigkeit in Bezug auf diese Anwendung realistisch zu prüfen, wurde nicht ein Quarz vermessen, sondern es wurde ein Empfangssignal<sup>3</sup>, (Abbildung 4.1 auf der nächsten Seite) eines ISM-Empfängers, mit einer Anstiegszeit von ca.  $5\mu s$ , gleichzeitig als Start- und Stoppsignal verwendet. Abbildung 4.2 auf der nächsten Seite zeigt den Messaufbau schematisch. Es wurden 10000 Messungen mit einer Messrate von ca. 3500 Messungen pro Sekunde durchgeführt. Dabei sollte theoretisch jede einzelne Messung eine Zeitdifferenz von  $0ns$  ergeben, da der Start- und Stoppimpuls gleichzeitig auftreten. Durch die oben genannten Gründe treten jedoch Fehler auf, Abbildung 4.3 auf Seite 49 zeigt das Wahrscheinlichkeitsdiagramm dieser Messung, dabei ist  $t$  die positive oder negative Abweichung der Messung,

---

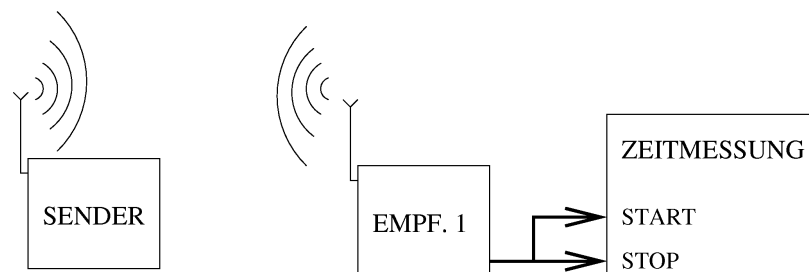
<sup>1</sup>Resolution Adjust Modus mit normaler Auflösung.

<sup>2</sup>Least Significant Bit

<sup>3</sup>Ein 15kHz Rechteck.



**Abbildung 4.1:** Testsignal (Kanal2) zur Prüfung der Zeitmessung



**Abbildung 4.2:** Messaufbau zur Prüfung der Messfehler der Zeitmessung

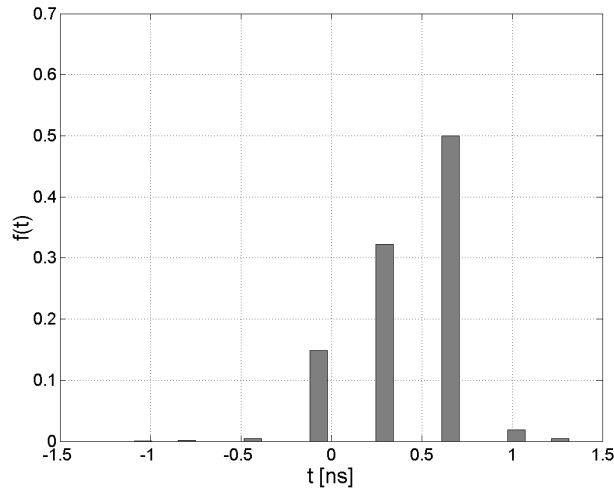
der berechnete Mittelwert der Abweichung beträgt dabei ca.  $480\text{ps}$ . Dieser Zeitmessfehler entspricht einer maximalen Wegabweichung von maximal ca.  $15\text{cm}$ . In Abbildung 4.3 auf der nächsten Seite kann man sehen, dass es sich beim Fehler teilweise um einen Offsetfehler handelt, der durch einen Nullabgleich verbessert werden kann.

In einem weiteren Versuch wurden Laufzeiten von Gattern und die Laufzeit eines Drahtstückes vermessen.

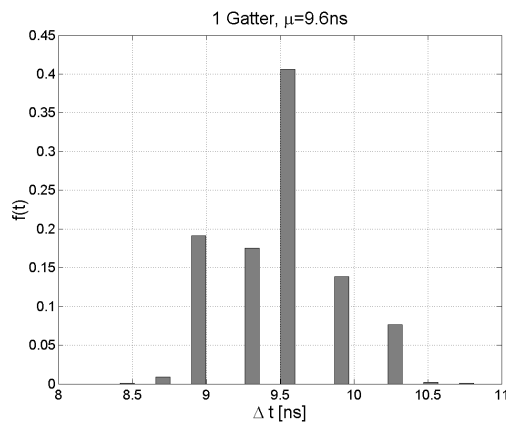
Die Laufzeiten von einem und von zwei TTL Gattern (SN74LS125) wurden ohne Nullabgleich und ohne Mittelwertbildung durchgeführt, da die Laufzeiten der Gatter relativ groß sind. Die Laufzeit eines Drahtstückes wurde mit Differenzmessung und Mittelwertbildung ermittelt, da die Laufzeit hier sehr klein und fast am Limit des Messmoduls ist. Bei jeder Messung wurden 30000 Messwerte erfasst. Zur Kontrolle wurden Einzelmessungen mit einem Oszilloskop durchgeführt, welche zwar nicht repräsentativ sind, jedoch qualitativ die Messungen prüfen sollen. Abbildung 4.4 auf der nächsten Seite zeigt das Ergebnis der Laufzeitmessung eines Gatters, Abbildung 4.5 auf Seite 50 zeigt das Ergebnis bei zwei Gattern. In Abbildung 4.5(b) auf Seite 50 kann man sehen dass, die Steigungen der beiden Flanken nicht gleich sind und daher das Ergebnis durch die Triggerschwellen beeinflusst wird.

Bei der Messung des Drahtes wurde zur weitgehenden Unterdrückung eines Offsetfehlers das Testsignal als Start und Stop verwendet und ein Nullabgleich

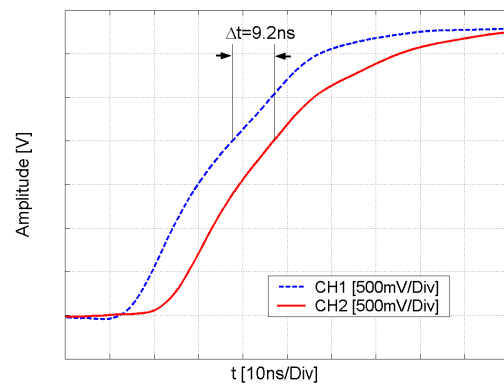




**Abbildung 4.3:** Messfehler des Zeitmessmoduls (10000 Messungen)



(a) 30000 Messungen, Zeitmessmodul



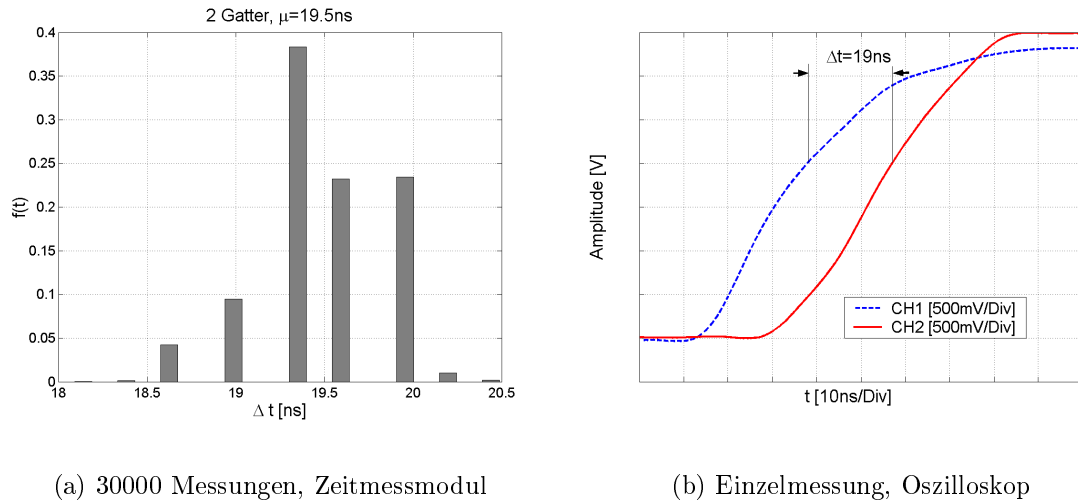
(b) Einzelmessung, Oszilloskop

**Abbildung 4.4:** Messung der Laufzeit eines Gatters

(vgl. Abschnitt A.1.3) durchgeführt. Die linke Seite in Abbildung 4.6 auf Seite 51 zeigt das Messergebnis dieser Messung. Die Abstufung der einzelnen Messergebnisse im Wahrscheinlichkeitsdigramm liegen dabei weit unter der eigentlichen Auflösung des Zeitmessmoduls, da bereits jeder der 30000 Messwerte durch einen gleitenden Mittelwert über 1000 Werte gebildet wurde. Die rechte Seite von Abbildung 4.6 auf Seite 51 zeigt dann die Messung nach Einfügen des Drahtstücks.

Die Differenz  $\Delta\mu$  zwischen den beiden berechneten Mittelwerten  $\mu_1$  und  $\mu_2$  entspricht der Laufzeit des Drahtstücks, sie liegt bei ca.  $0.6\text{ns}$ . Zur qualitativen Kontrolle wurden wieder Einzelmessungen mit einem Oszilloskop durchgeführt. Bei der Messung am gleichen Messpunkt<sup>4</sup> musste auch hier ein Offsetfehler von  $1\text{ns}$  festgestellt werden (Abbildung 4.7(a) auf Seite 51). Daher wurde ebenfalls eine Differenzmessung

<sup>4</sup>Das gleiche Signal wird als Eingang von Kanal 1 und Kanal 2 verwendet.



**Abbildung 4.5:** Messung der Laufzeit von zwei Gattern

durchgeführt, d.h. die Zeitdifferenz einer Einzelmessung ohne Drahtstück wurde von einer Messung mit Drahtstück subtrahiert. Abbildung 4.7(b) auf der nächsten Seite zeigt die Messung mit Drahtstück. Die Differenz dieser Messungen beträgt ca.  $0.9\text{ns}$ , d.h. der Unterschied zwischen dem Zeitmessmodul und der Einzelmessung beträgt ca.  $0.3\text{ns}$ .

In einem weiteren Versuch wurde die Laufzeitdifferenz bei Drahtstücken mit verschiedenen Längen ermittelt. Es wurden wieder 30000 Messungen mit einem gleitenden Mittelwert durchgeführt. Als Drähte wurden zwei verdrehte isolierte Kupferdrähte verwendet, wobei eine der beiden Adern zweiseitig auf Masse gelegt war. Zunächst wurde ein Nullabgleich mit einem, wenigen Zentimeter langem, Drahtstück durchgeführt. Der Mittelwert  $\mu_1$  dieser Messung betrug nach dem Nullabgleich daher annähernd  $0\text{ns}$  (Abbildung 4.8 auf Seite 52). Als Nächstes wurde ein um  $10\text{cm}$  längeres Drahtstück vermessen, mit diesem konnte dann ein Mittelwert  $\mu_2 = 0.48\text{ns}$  gemessen werden. Mit einem um  $20\text{cm}$  längeren Drahtstück ergab die Messung  $\mu_3 = 0.93\text{ns}$ . Zuletzt wurde ein um  $30\text{cm}$  längerer Draht verwendet, bei welchem ein Mittelwert  $\mu_4$  von  $1.35\text{ns}$  gemessen werden konnte. Geht man von einer Ausbreitungsgeschwindigkeit von  $2/3$  der Lichtgeschwindigkeit aus, erhält man aus den Messwerten  $\mu$ , die in Tabelle 4.1 angegebenen Werte.

| Längendifferenz | Messwert        | berechnete Differenz | Abweichung |
|-----------------|-----------------|----------------------|------------|
| $10\text{cm}$   | $0.48\text{ns}$ | $9.7\text{cm}$       | $3\%$      |
| $20\text{cm}$   | $0.93\text{ns}$ | $18.7\text{cm}$      | $6.5\%$    |
| $30\text{cm}$   | $1.35\text{ns}$ | $27.1\text{cm}$      | $9.7\%$    |

**Tabelle 4.1:** Vergleich der tatsächlichen Drahtlängen mit den Messwerten

Mit dieser abschließenden Messung konnte gezeigt werden, dass mit dem Zeitmessmodul, durch Mittelwertbildung, auch sehr kleine Zeitdifferenzen vermessen werden können.

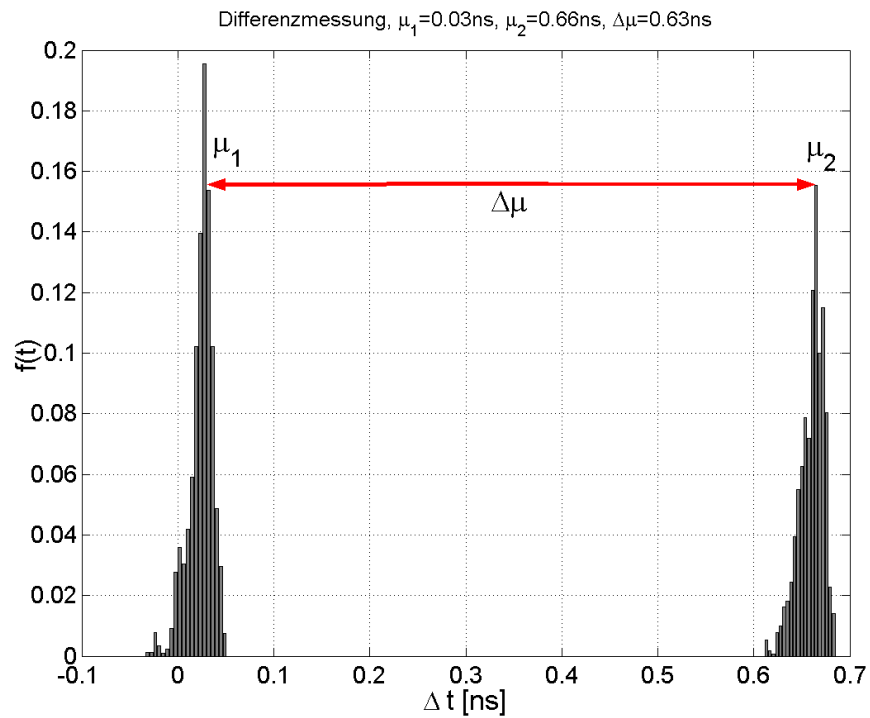
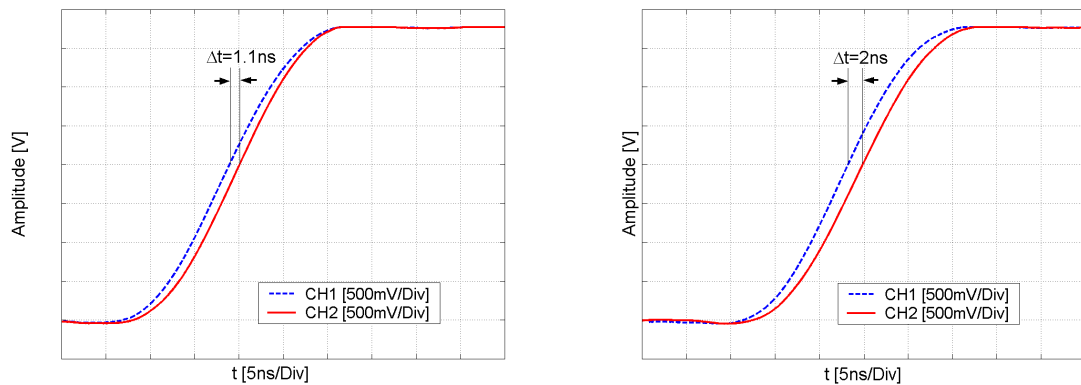


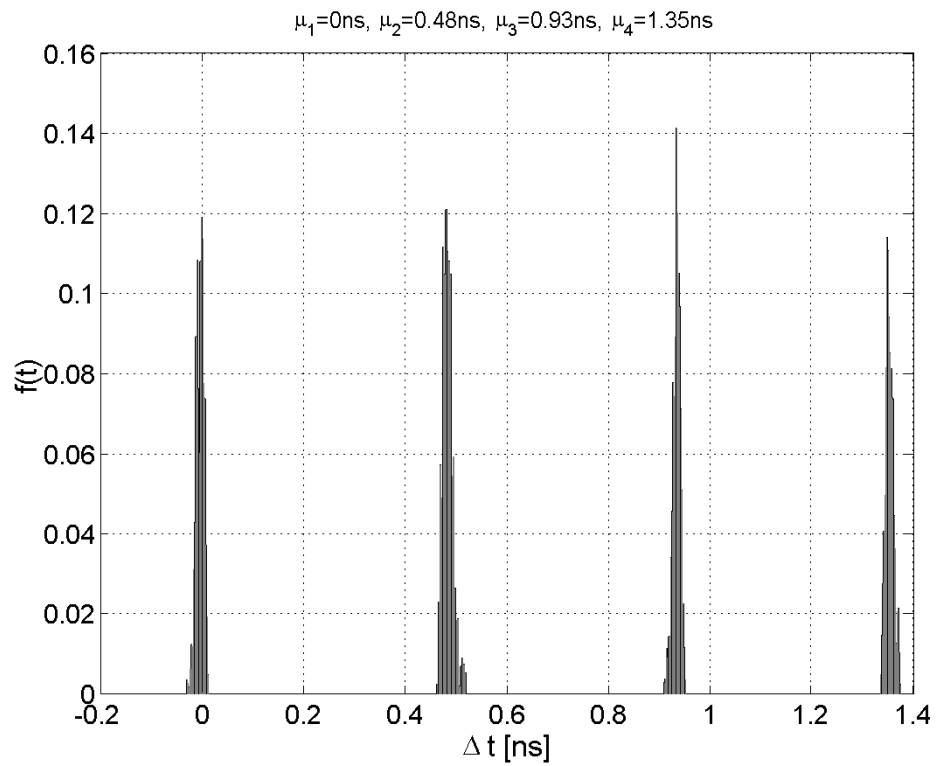
Abbildung 4.6: Laufzeitmessung von einem Stück Draht



(a) Einzelmessung am gleichen Messpunkt

(b) Einzelmessung mit Drahtstück

Abbildung 4.7: Einzelmessung, Oszilloskop



**Abbildung 4.8:** Zeitdifferenzen zwischen Drähten mit einer Längendifferenz von  $10\text{cm}$ ,  $20\text{cm}$  und  $30\text{cm}$  (30000 Messungen)

## 4.2 Fazit

Schon die große Anzahl an Konzepten für Positionsbestimmungssysteme zum Verhältnis der kleinen Anzahl an tatsächlich realisierten Systemen zeigt, dass es sich bei der Ortung im Nahbereich um keine triviale Aufgabe handelt. Diese Arbeit konnte keine neuen revolutionären Ideen aufzeigen und ebenfalls kein komplettes System umsetzen. Es konnte aber eine wichtige Systemkomponente, eine Zeitmessung mit einer Ortungssoftware realisiert werden. D.h. die hier entwickelte Zeitmessung ist eine komplett unabhängige abgekoppelte Komponente, die für weiterführende Untersuchungen und Ansätze verwendet werden kann. Sie könnte auch in andere Anwendungen eingesetzt werden, z.B. zur Laserentfernungsmessung oder für Ultraschallmessungen in Festkörpern, praktisch in allen Anwendungen in denen sehr präzise Zeitdifferenzmessungen notwendig sind.

Die Software dieser Zeitmessung beinhaltet ebenfalls ein Modul, das aus gemessenen Zeitdifferenzen die Position eines Senders berechnen kann.

Im Zuge der Arbeit hat sich gezeigt, dass als Medium zum Orten eines Senders Ultraschall zwar möglich ist, für praktische Anwendungen jedoch schlecht geeignet ist. Funk wäre besser geeignet, die technische Realisierung geeigneter Komponenten zur Positionsbestimmung durch TDOA-Messungen ist jedoch nicht trivial, da dazu nur komplexe breitbandige Systeme geeignet sind.

Einen guten Ansatz dafür dürften SAW<sup>5</sup>-Delay-Lines darstellen. Da für diese keine Synchronisation notwendig ist und mit der Zeitmessung direkt die Zeitdifferenzen zwischen den einzelnen Korrelationsmaxima vermessen werden können. Evtl. sind auch digitale Korrelatoren oder die direkte Messung von empfangenen Pulsen, von UWB-Systemen, geeignet.

---

<sup>5</sup>Surface Accoustic Wave

# Anhang A

## Dokumentation der Zeitmessung

### A.1 Benutzerhandbuch des GUI

#### A.1.1 Systemanforderungen

Zum Ausführen der Anwendung wird das Microsoft .NET Framework 1.1 benötigt. Dieses ist in neuen Versionen von Windows XP bereits enthalten, bei älteren Versionen muss es jedoch nachträglich installiert werden. Die Installation kann über ein Windows Update erfolgen oder mit einem auf der Microsoft Homepage<sup>1</sup> separat erhältlichen Paket durchgeführt werden. Für ältere Windows-Versionen wie Windows 2000 oder Windows NT ist das .NET Framework ebenfalls verfügbar.

#### A.1.2 Installation

Folgende Anleitung wurde für Windows XP erstellt, für andere Versionen von Microsoft Windows ist der Installationsvorgang ähnlich aber nicht gleich. Die Installation ist einfach und wird durch die Abbildungen A.1, A.2 und A.3 fast vollständig beschrieben. Folgend wird jeder notwendige Schritt kurz erläutert.

Der Installations-Assistent, der durch die Installation der Anwendung führt, wird mit einem Doppelklick auf die Datei **Setup.exe** gestartet, es erscheint der Willkommen-Bildschirm des Setup-Programms (Abbildung A.1(a) auf Seite 57), mit **Weiter** wird fortgefahren. Am folgenden Bildschirm (Abbildung A.1(b) auf Seite 57) kann der Ordner in dem die Anwendung installiert werden soll ausgewählt werden. Weiters kann hier angegeben werden, ob die Anwendung für alle Benutzer oder den aktuellen Benutzer installiert werden soll. Im folgenden Schritt kann mit **Weiter** die Installation der Anwendung tatsächlich gestartet werden (Abbildung A.1(c) auf Seite 57). Der Fortschritt der Installation wird nun angezeigt (Abbildung A.1(d) auf Seite 57), sobald die Installation abgeschlossen ist kann das Setup-Programm mit **Schließen** beendet werden (Abbildung A.1(e) auf Seite 57). Die Installation ist nun aber noch nicht komplett abgeschlossen. Die Treiber für die Hardware sind

---

<sup>1</sup>Weitere Infos dazu unter: <http://www.microsoft.com>

nun auf die Festplatte kopiert worden, müssen aber vom Hardware-Assistenten noch eingerichtet werden. Dazu muss die Zeitmessung an einen freien USB-Port des PCs angeschlossen werden. In der Taskleiste erscheint, dass eine neue Hardware gefunden wurde (Abbildung A.2(a) auf Seite 58), der Hardwareassistent öffnet sich automatisch (Abbildung A.2(b) auf Seite 58). Mit der bereits ausgewählten Option **Software automatisch installieren** wird nach dem passenden Treiber gesucht (Abbildung A.2(c) auf Seite 58). Wenn dieser gefunden wurde, erscheint, dass der Windows Logotest nicht bestanden wurde (Abbildung A.2(d) auf Seite 58), hier sollte trotzdem **Installation fortsetzen** gewählt werden. Nun ist zu lesen, dass die Software installiert wurde, mit **Fertig stellen** wird dieser Schritt abgeschlossen (Abbildung A.2(e) auf Seite 58). In der Taskleiste erscheint nun, dass die neue Hardware gefunden wurde und verwendet werden kann (Abbildung A.2(f) auf Seite 58). Durch den Prozess der ReNumeration (vgl. Abschnitt 3.3.2) muss der gleichen Hardware nach dem Firmware-Upload noch einmal ein Treiber zugewiesen werden. Um dies durchzuführen kann die Software über die am Desktop erzeugte Verknüpfung mit dem Namen **ZeitmessungGui** oder im Startmenü gestartet werden. Wenn das USB-Anschlußkabel der Zeitmessung mit dem PC verbunden ist, wird mit dem Button **Verbinden** (in der Symbolleiste) zum ersten Mal eine Verbindung zur Hardware hergestellt. Da noch kein Treiber für diese Hardware installiert ist, erscheint in der Statusleiste der Anwendung **Fehler F1** (Abbildung A.3(a) auf Seite 59). Gleichzeitig sollte in der Taskleiste von Windows wieder die Meldung **Neue Hardware gefunden** erscheinen (Abbildung A.3(b) auf Seite 59) und sich anschließend wieder der Hardware-Assistent öffnen. Die Vorgangsweise im Hardware-Assistenten ist nun analog zu der oben beschriebenen, bis wieder die Meldung erscheint, dass die neue Hardware nun verwendet werden kann (Abbildung A.2(f) auf Seite 58). Eine Verbindung zur Hardware kann nun hergestellt werden, indem die fehlgeschlagene Verbindung mit dem Button **Trennen** getrennt wird und anschließend mit **Verbinden** wieder aufgebaut wird.

### A.1.3 Bedienung

Die Bedienung der Anwendung orientiert sich an gängigen Windows Anwendungen, wobei fast alle Funktionen über sog. Tool-Fenster verfügbar sind, welche im Menüpunkt **Ansicht** ein- und ausgeblendet werden können. Folgende Tool-Fenster sind in Version 1.0 verfügbar:

- **Datenanzeige**  
Dieses Fenster zeigt die empfangenen Daten im Rohformat an. Jede Zeile entspricht dem in Abbildung 3.16 auf Seite 36 dargestellten Format in dezimaler Schreibweise. Aufgrund der großen Datenmengen können nicht alle Daten dargestellt werden, es werden daher alle 0.5sec die letzten zehn gemessenen Werte dargestellt (Abbildung A.5(c) auf Seite 60).
- **Simulations Konfiguration**  
Dieses Tool ermöglicht es, Zeitdifferenzen zu simulieren ohne mit der Hardware verbunden zu sein. Es gibt zwei Modi: **Manuell** und **Zufall**. Im Modus **Manuell** können Zeitdifferenzen manuell über Schieberegler eingestellt werden, im Modus

**Zufall** werden Zeitdifferenzen zufällig (gleichverteilt) zwischen den eingestellten Grenzen **Minimum** und **Maximum** erzeugt. Die gewünschte **Datenrate**, mit der Messdaten simuliert werden sollen, kann ebenfalls eingestellt werden (Abbildung A.4(c) auf Seite 59). Gestartet und gestoppt wird die Simulation mit dem Button **Simulation starten** in der Symbolleiste.

- Zeitanzeige

Die Zeitanzeige zeigt die gemessenen Zeitdifferenzen der einzelnen Kanäle an, der dritte Kanal (T3) zeigt die Differenz zwischen Kanal eins (T1) und zwei (T2) an. Mit den Buttons **Nullabgleich** kann für jeden Kanal getrennt ein Nullabgleich durchgeführt werden, d.h. durch das Aktivieren wird der aktuell angezeigte Zeitwert von zukünftigen Werten subtrahiert. Mit einer weiteren Option kann zwischen der Anzeige der aktuellen Messwerte (**Aktuell**) und Mittelwerten<sup>2</sup> (**Mittelwert**) gewählt werden (Abbildung A.5(f) auf Seite 60).

- Logging

Die Funktion Logging ermöglicht das Protokollieren von Messdaten in eine Textdatei<sup>3</sup>. Es kann wie bei der Zeitanzeige zwischen den aktuellen Messwerten und den Mittelwerten gewählt werden. Weiters erfolgt in diesem Tool-Fenster die Auswahl welche Kanäle protokolliert werden und wie viele Messwerte aufgezeichnet werden (Abbildung A.5(b) auf Seite 60).

- Positionsanzeige

Dieses Fenster zeigt die X- und Y-Koordinate der berechneten Empfängerposition an. Die Berechnungsmethode ist davon abhängig, ob eine eindimensionale oder zweidimensionale Positionbestimmung erfolgt. Die diesbezügliche Auswahl erfolgt im Menüpunkt **Datei-Einstellungen** (Abbildung A.4(b) auf Seite 59).

- Geometrie Konfiguration

Dieses Tool-Fenster ermöglicht die Konfiguration der Empfängerpositionen, die im Fenster dargestellte Grafik erklärt die Koordinatenangaben. Im eindimensionalen Modus werden nur die Einstellungen von Empfänger A und B berücksichtigt (Abbildung A.5(e) auf Seite 60).

- Positions-Grafik

Die Positions-Grafik zeigt die aktuelle Position des Senders und der Empfänger grafisch an. Die Darstellung ist davon abhängig, ob eine eindimensionale (Abbildung A.4(a) auf Seite 59) oder eine zweidimensionale (Abbildung A.5(a) auf Seite 60) Positionsbestimmung erfolgt. Mit der Option **Spur** wird eine Spur mit den passierten Positionen gezeichnet, der Button **Spur löschen** löscht alle bisherigen Positionen.

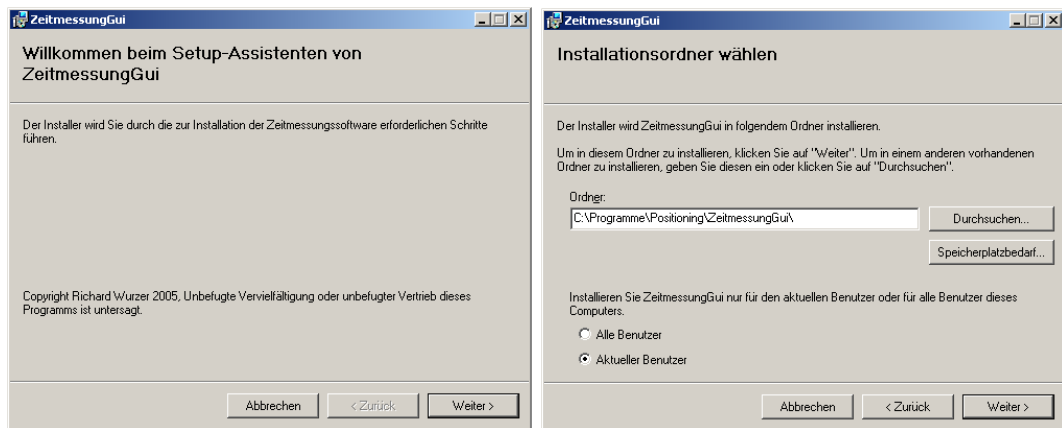
Um ein Messung zu beginnen, muss lediglich die Hardware an einen freien USB-Port angeschlossen werden und in der Symbolleiste der Button **Verbinden** gedrückt werden. Nach ca. drei Sekunden beginnt die Messung, die aktuelle Mess- und Datenrate wird in der Statusleiste angezeigt.

---

<sup>2</sup>In Version 1.0 handelt es sich dabei um einen gleitenden Mittelwert von 1000 Messwerten.

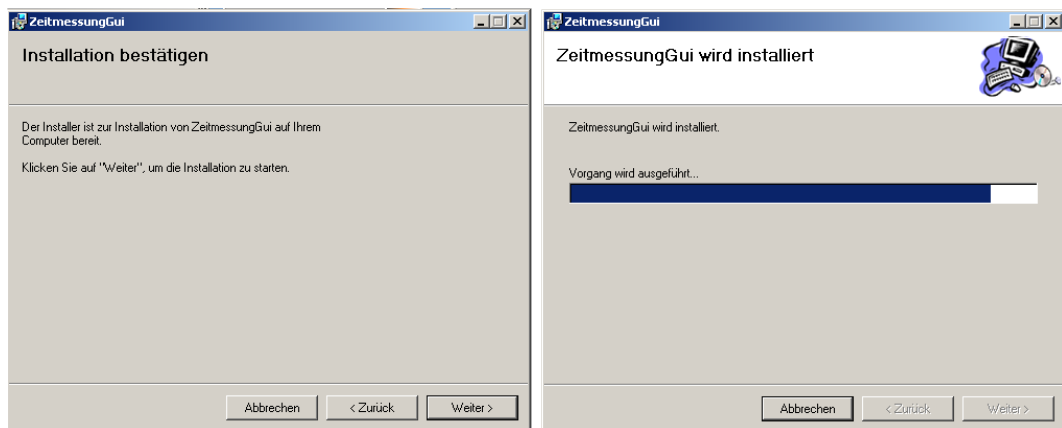
<sup>3</sup>Die Messwerte werden durch Tabulator und Newline getrennt.





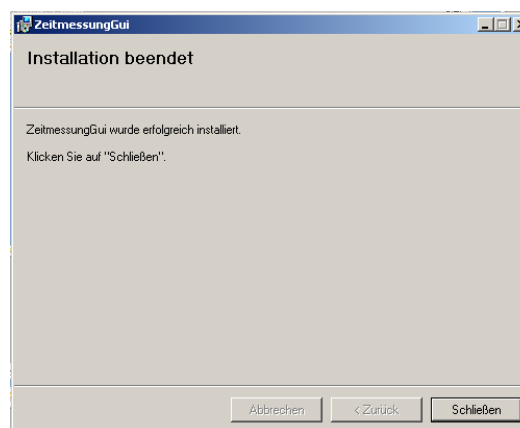
(a) Willkommen-Bildschirm

(b) Auswahl des Installationsordners



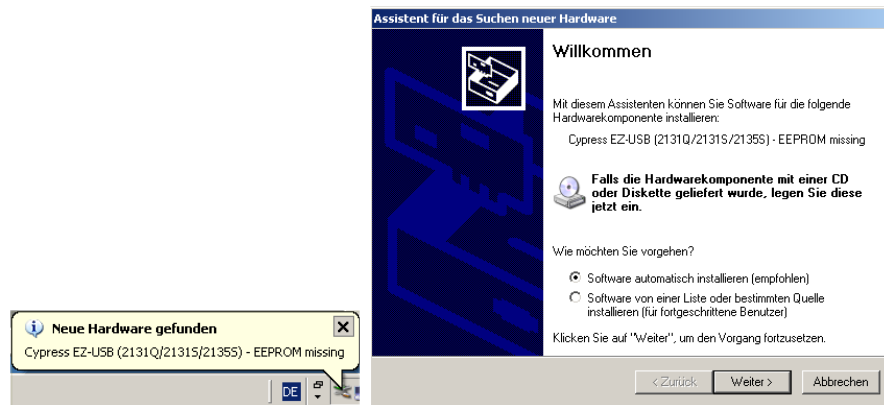
(c) Installation bestätigen

(d) Installationsfortschritt



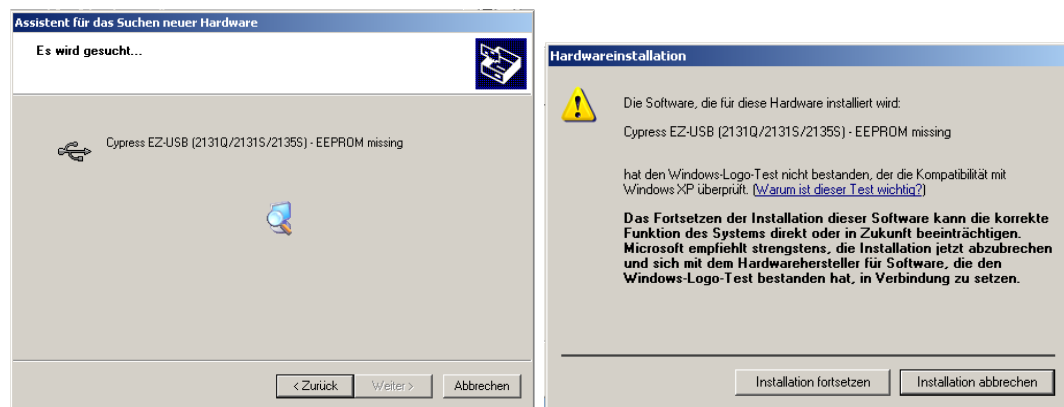
(e) Installation abschließen

**Abbildung A.1:** Installation der Software mit dem Setup-Assistenten



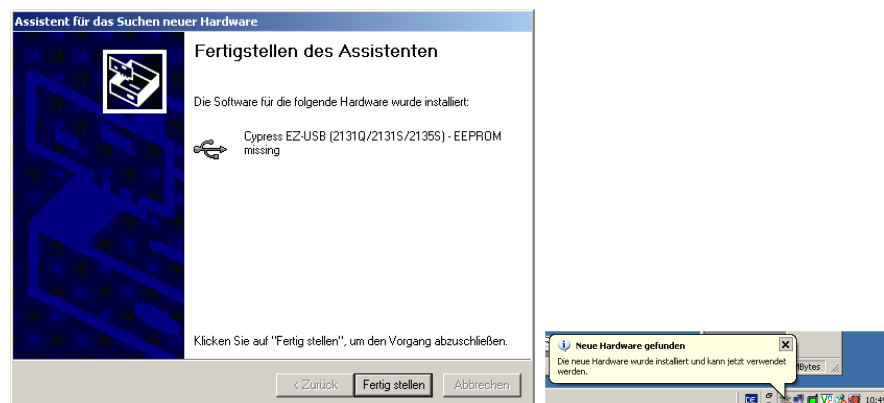
(a) Neue Hardware

(b) Hardware-Assistent



(c) Treiber suchen

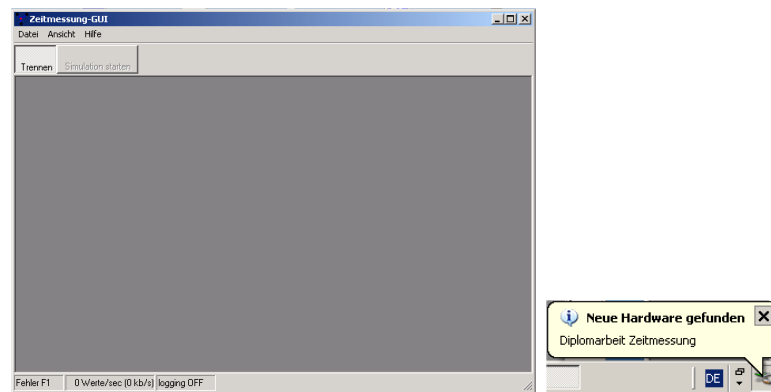
(d) Windows Logo-Test



(e) Fertig stellen

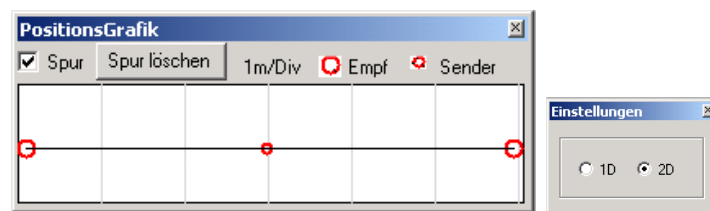
(f) Hardware kann verwendet werden

Abbildung A.2: Einrichten der Treiber für die Hardware Abschnitt 1



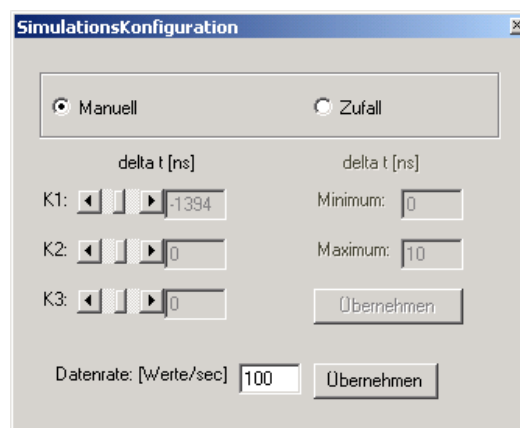
(a) Fehler beim Verbindungsaufbau

(b) Neue Hardware

**Abbildung A.3:** Einrichten der Treiber für die Hardware Abschnitt 2


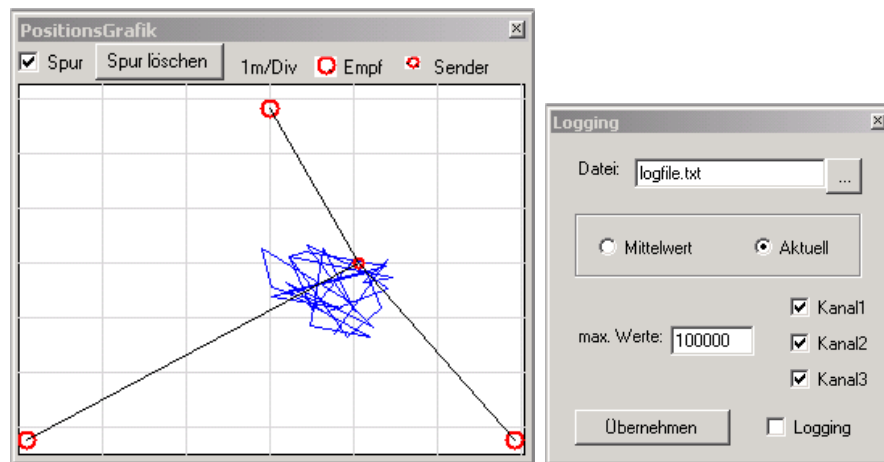
(a) Positions Grafik 1D

(b) Einstellungen



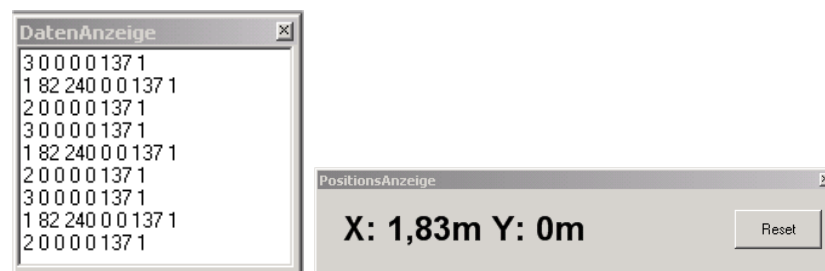
(c) Simulations Konfiguration

**Abbildung A.4:** Bedienung des GUI Teil 1



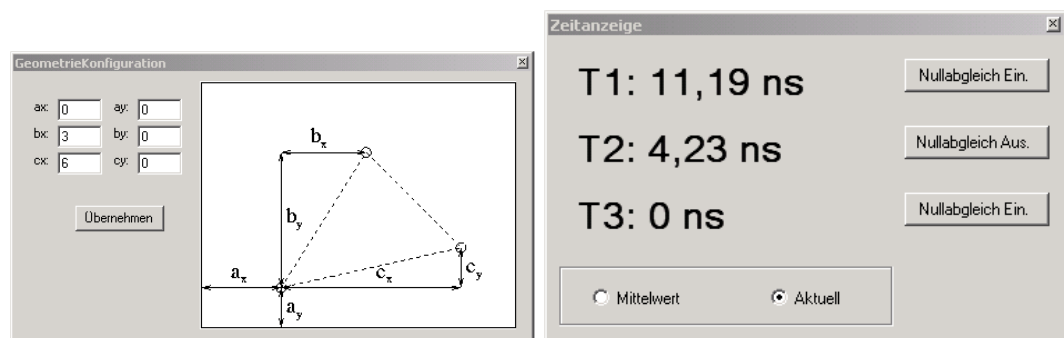
(a) Positions Grafik 2D

(b) Logging



(c) Datenanzeige

(d) Positionsanzeige



(e) Geometrie Konfiguration

(f) Zeitanzeige

Abbildung A.5: Bedienung des GUI Teil 2

## A.2 Hinweise zum Zeitmessmodul

### A.2.1 Benützungshinweis

Es wird darauf hingewiesen, dass es sich bei der im Zuge dieser Arbeit entwickelten Hardware um einen Experimentator handelt, der keiner der notwendigen Vorschriften (z.B. ÖVE-Norm) entspricht. D.h. es kann nicht ausgeschlossen werden, dass durch Fehlfunktionen des Gerätes auch andere damit verbundenen Geräte beschädigt werden. Die Benützung ist auf eigene Gefahr.

### A.2.2 Konfiguration

Grundsätzlich wird das Zeitmessmodul automatisch über die Firmware konfiguriert, um die Anwendungsmöglichkeiten noch flexibler zu gestalten gibt es zusätzlich die Möglichkeit bestimmte Hardwaremerkmale mit Jumpern zu verändern, Tabelle A.1 listet diese Optionen auf, für die Bedeutung der einzelnen Optionen wird auf (Acam Messelectronic GmbH, 2001) und (Cypress Semiconductor, 2002b) verwiesen.

| Jumper | Funktion             | Pins 1-2 | Pins 2-3 |
|--------|----------------------|----------|----------|
| JP1    | Core Spannung TDC1   | +VCC     | Extern   |
| JP2    | Fastread/Read TDC1   | FRD      | RD       |
| JP3    | Fastread/Read TDC2   | FRD      | RD       |
| JP4    | Interrupt TDC1       | INT1#    | INT4     |
| JP5    | Fastwrite/Write TDC2 | FWR      | WR       |
| JP6    | Fastwrite/Write TDC1 | FWR      | WR       |
| JP7    | Chipselect TDC1      | PC0      | GND      |
| JP8    | Chipselect TDC2      | PC1      | GND      |
| JP9    | Interrupt TDC2       | INT5#    | INT6     |
| JP10   | Core Spannung TDC2   | +VCC     | Extern   |

**Tabelle A.1:** Jumperoptionen des Zeitmessmoduls

### A.2.3 Spezifikation der Eingänge

| Parameter                         | Wert            |
|-----------------------------------|-----------------|
| max. Eingangsspannung             | 3.8V            |
| typ. Eingangsspannung             | 3.3V            |
| pos. Triggerschwelle              | ca. 2.0V        |
| neg. Triggerschwelle              | ca. 0.8V        |
| max. Messrate im Einkanal Betrieb | ca. 7000/sec    |
| max. Zeitdifferenz Start-Stop     | ca. 4.6 $\mu$ s |

**Tabelle A.2:** Eingangspezifikation des Zeitmessmoduls bei ca. 20° C

# Literaturverzeichnis

- [Acam Messelectronic Gmbh 2001] ACAM MESSELECTRONIC GMBH: *TDC-GP1 Funktionsbeschreibung*. 2001. – URL [http://www.acam.de/Documents/Deutsch/DB\\_GP1\\_d.pdf](http://www.acam.de/Documents/Deutsch/DB_GP1_d.pdf). – Am Hasenbiel 27, D-76297 Stutensee-Blankenloch
- [Acam Messelectronic Gmbh 2004] ACAM MESSELECTRONIC GMBH: 2004. – URL <http://www.acam.de>. – Am Hasenbiel 27, D-76297 Stutensee-Blankenloch
- [AeroScout Enterprise Visibility Solutions 2004] AEROScout ENTERPRISE VISIBILITY SOLUTIONS: *AerScout Location Reveiver Data Sheet*. 2004. – URL [www.aeroscout.com](http://www.aeroscout.com). – 1450 Fashion Island Blvd., Suite 510, San Mateo, CA 94404
- [Ahmann 2004] AHMANN, Peter: *Individuelle ortsabhängige RFID-Navigation im Gebäude*. Westfälische Wilhelms-Universität Münster, Fachbereich Geowissenschaften-Studiengang Geoinformatik, Diplomarbeit, April 2004
- [Aitenbichler 2003] AITENBICHLER, Erwin: Ortungssysteme für mobile Endgeräte. In: *GI Jahrestagung (1)*, 2003, S. 202–206
- [Allen u. a. 2001] ALLEN, B.Danette ; BISHOP, Gary ; WELCH, Greg: *Tracking: Beyond 15 Minutes of Thought*. Department of Computer Science, University of North Carolina at Chapel Hill. 2001. – SIGGRAPH 2001, Course 11
- [Angus Technologie Limited 2005] ANGUS TECHNOLOGIE LIMITED: *Air Ultrasonic Ceramic Transducer 400ST/R160 Datasheet*. 2005. – URL <http://www.angus.com.hk/ut.html>
- [Bauer 2002] BAUER, Daniel: *Ultraschall*. Universität Karlsruhe, Forschungsgruppe IAIM. 2002. – URL [http://www.iaim.ira.uka.de/Teaching/ProseminarMedizin/Ausarbeitungen/SS2002/02\\_Ultraschall.pdf](http://www.iaim.ira.uka.de/Teaching/ProseminarMedizin/Ausarbeitungen/SS2002/02_Ultraschall.pdf)
- [Beuth u. a. 2001] BEUTH, Klaus ; HANEBUTH, Richard ; KURZ, Günter ; LÜDERS, Christian: *Nachrichtentechnik*. Bd. 2. Auflage. Vogel, 2001. – ISBN 3-8023-1848-X
- [BMVIT 2003] BMVIT: *FunkSchnittstellenbeschreibung, Zusammenstellung auf Grundlage der Verordnung mit der generelle Bewilligungen erteilt werden*. 2003. – Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
- [Burg u. a. 2001] BURG, Klemens ; HAF, Herbert ; WILLE, Friedrich: *Höhere Mathematik für Ingenieure*. Teubner, 2001 (1). – ISBN 3-519-42955-1

- [Chung und Ha 2003] CHUNG, Woo C. ; HA, Dong S.: An Accurate Ultra Wideband (UWB) Ranging for Precision Asset Location. In: *Int. Conf. on Ultra Wideband Systems and Technologies* (2003), November, S. 389–393
- [Cypress Semiconductor 1999] CYPRESS SEMICONDUCTOR: *EZ-USB General Purpose Driver Specification*. 1999. – URL <http://www.cypress.com>
- [Cypress Semiconductor 2002a] CYPRESS SEMICONDUCTOR: *EZ-USB Contents and Tutorial*. 2002. – URL <http://www.cypress.com>
- [Cypress Semiconductor 2002b] CYPRESS SEMICONDUCTOR: *EZ-USB Technical Reference*. 2002. – URL <http://www.cypress.com>
- [Dijk 2004] DIJK, Esko O.: *Indoor Ultrasonic Position Estimation Using a Single Base Station*, Technische Universität Eindhoven, Doktorarbeit, Oktober 2004
- [Gerhäuser 2003] GERHÄUSER, Heinz: *Witrack - Wireless Tracking, Produktblatt*. Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS, Abteilung Hochfrequenz- und Mikrowellentechnik. 2003. – URL [www.iis.fraunhofer.de](http://www.iis.fraunhofer.de). – Am Wolfsmantel 33, 91058 Erlangen
- [Harter u.a. 1999] HARTER, Andy ; HOPPER, Andy ; STEGGLES, Pete ; WARD, Andy ; WEBSTER, Paul: The anatomy of a context-aware application. In: *MobiCom '99: Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*, ACM Press, 1999, S. 59–68. – ISBN 1-58113-142-9
- [Hesser 2003] HESSER, Jürgen: *Vorlesung Bildgebende Systeme, Kapitel 6*. Universität Mannheim. 2003. – URL <http://webrum.uni-mannheim.de/math/scovis/Vorlesung/BildgebendeSysteme/bildgebende%20Systeme/Ws0203/Skript6.pdf>
- [Hightower und Borriello 2001a] HIGHTOWER, Jeffrey ; BORRIELLO, Gaetano: Location Sensing Techniques / University of Washington, Department of Computer Science and Engineering. Seattle, WA, July 2001 (01-07-01). – UW CSE
- [Hightower und Borriello 2001b] HIGHTOWER, Jeffrey ; BORRIELLO, Gaetano: Location Systems for Ubiquitous Computing. In: *IEEE Computer* 34 (2001), August, Nr. 8, S. 57–66. – URL [citeseer.ist.psu.edu/article/reyn01location.html](http://citeseer.ist.psu.edu/article/reyn01location.html)
- [Hightower u.a. 2001] HIGHTOWER, Jeffrey ; VAKILI, Chris ; BORRIELLO, Gaetano ; WANT, Roy: *Design and Calibration of the SpotON Ad-Hoc Location Sensing System*. August 2001. – URL <http://seattle.intel-research.net/people/jhightower/pubs/hightower2001design/hightower2001design.pdf>
- [Karamali und Wilson 2002] KARAMALI, Apostolia ; WILSON, Andrew: *Galileo das europäische Programm für weltweite Navigationsdienste*. ESA Publications Division, 2002. – ISBN 92-9092-730-5
- [Klein 2004] KLEIN, M.: *Positionsbestimmung in Gebäuden*. Fachhochschule Coburg. 2004

- [Lamancusa 2000] LAMANCUSA, J.S.: *Outdoor Sound Propagation*. Penn State University, Department of Mechanical and Nuclear Engineering. 2000. – URL [http://www.me.psu.edu/lamancusa/me458/10\\_osp.pdf](http://www.me.psu.edu/lamancusa/me458/10_osp.pdf)
- [Ljungh u. a. 2000] LJUNGH, Roland ; MATTSSON, Sören ; SAHLE, Kristina ; SANDSTRÖM, Rickard ; ÅMAN, Erik: WIPS - Wireless Indoor Positioning System, Technical Documentation / Department of Teleinformatics, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden. URL <http://2g1319.ssv1.kth.se/2000/group12/>, 2000 (2G1303 Telecommunications Systems). – Forschungsbericht
- [Opto Diode Corp. 2004] OPTO DIODE CORP.: *Super High-Power GaAIAs IR Emitter OD-100 Datasheet*. 2004. – URL <http://www.optodiode.com>. – 750 Mitchell Road Newbury Park, CA 91320
- [Priyantha u. a. 2000] PRIYANTHA, Nissanka B. ; CHAKRABORTY, Anit ; BALAKRISHNAN, Hari: The Cricket location-support system. In: *Mobile Computing and Networking*, URL [citeseer.ist.psu.edu/priyantha00cricket.html](http://citeseer.ist.psu.edu/priyantha00cricket.html), 2000, S. 32–43
- [Raju 2001] RAJU, Murugavel: *Ultrasonic Distance Measurement with the MSP430, Application Report*. 2001
- [Roth 2002] ROTH, J.: *Mobile Computing*. dpunkt-Verlag, 2002. – ISBN 3-89864-165-1
- [Schäpers u. a. 2004] SCHÄPERS, Arne ; HUTTARY, Rudolf ; BREMES, Dieter: *C# Professionelle Programmierung mit Visual Studio .NET*. Markt und Technik, 2004. – ISBN 3-8272-6773-0
- [Schwarz 1997] SCHWARZ, H. R.: *Numerische Mathematik*. Bd. 4. B. G. Teubner Stuttgart, 1997. – ISBN 3-519-32960-3
- [Time Domain Corp. 2001] TIME DOMAIN CORP.: *Pulson Technology Overview*. 2001. – URL [http://www.timedomain.com/Files/downloads/techpapers/PulsONOverview7\\_01.pdf](http://www.timedomain.com/Files/downloads/techpapers/PulsONOverview7_01.pdf)
- [Ungerer und Bagci 2004] UNGERER, Theo ; BAGCI, Faruk: *Techniken des Ubiquitous Computing, 5. Vorlesung: Sensorik zum Location Tracking*. Universität Augsburg, Institut für Informatik, Lehrstuhl für Systemnahe Informatik und Kommunikationssysteme. 2004
- [Want u. a. 1992] WANT, Roy ; HOPPER, Andy ; FALCAO, Veronica ; GIBBONS, Jon: The Active Badge Location System. ORL, 24a Trumpington Street, Cambridge CB2 1QA, 1992 (92.1). – Forschungsbericht. – URL [citeseer.ist.psu.edu/want92active.html](http://citeseer.ist.psu.edu/want92active.html)
- [Ward u. a. 2003] WARD, Andy ; WEBSTER, Paul ; BATTY, Peter: *Local Positioning Systems-technology overview and applications*. 2003
- [Wigard 2004] WIGARD, Susanne: *Visual C++ 6.0*. Bhv, 2004. – ISBN 3-8266-8516-4



- [Yeung und Mitchell ] YEUNG, Eva H. ; MITCHELL, John: *Modelling of Ultra-wideband (UWB) Radio System*. – URL [citeseer.ist.psu.edu/543462.html](http://citeseer.ist.psu.edu/543462.html)
- [Zimmermann 2001] ZIMMERMANN, Roger: *Lokalisierung mobiler Geräte*. Department Informatik, ETH Zürich. 2001. – URL <http://www.vs.inf.ethz.ch/edu/SS2001/MC/beitraege/07-locationrep.pdf>

# Index

- .NET, 35, 37
- A/D-Wandlung, 42
- absolute Positionsbestimmung, 14
- Absorption, 40
- Absorptionskoeffizient, 40
- Abstandsmessung, 40
- Adiabatexponent, 39
- aktives Objekt, 14
- Anstiegszeit, 45
- Atmosphäre, 40
- Ausbreitungsgeschwindigkeit, 22, 39
- Automatisierungstechnik, 13
- Bandbreite, 12
- Bandspreizverfahren, 12
- Basisstation, 18
- Beacon, 17
- Bilderkennung, 15, 18
- Bildgebungssystem, 40
- C#, 35, 37
- CMOS, 28
- Cosinussatz, 24
- Distanzmessung, 41
- DLL, 36
- Doppelpulsauflösung, 28
- Druckschwankung, 39
- Dynamik, 15
- Echzeit, 13
- elektroakustischer Wandler, 40
- Emitterdiode, 45
- Empfangsfeldstärke, 12
- Energieabsorption, 40
- Euklidische-Norm, 37
- ferroelektrisch, 40
- FHSS, 19
- Firmware, 29
- Funk, ii
- Funkfrequenzband, 44
- Funknetz, 18
- GALILEO, 16
- Gatter, 27
- Gatterlaufzeit, 28
- Gauß-Puls, 19
- Gehörschädigung, 41
- Genauigkeit, 14
- geometrische Ausbreitung, 39
- GLONASS, 16
- GPS, 16
- GUI, 33
- Indoornavigation, 16
- Infrarot, ii, 45
- Inverter, 27
- Inverterbaustein, 42
- IR, 45
- IR-Sender, 17
- ISM, 19, 47
- Jacobi-Matrix, 27
- Keramik, 40
- Klassifikation, 14
- Konvergenz, 37
- Korrelation, 12
- Kosten, 14
- LAN, 20
- Landmarken, 17
- Laufzeit, 23, 27, 42
- Laufzeitdifferenz, ii, 19
- Laufzeitmessung, 13, 39
- Lichtgeschwindigkeit, 12
- Logistik, 13
- LSB, 47
- Luftdruck, 40
- Luftfeuchtigkeit, 40
- Masseteilchen, 40

- Messdaten, ii
- Mikrobar, 39
- Mikrocontroller, 42
- Mittenfrequenz, 40
- Mobilfunknetz, 18
- Mobiltelefon, 18
- molare Masse, 39
- molekulare Effekte, 40
- Multilateration, 18
- Multithreading, 37
  
- Nachbarschaftsnähe, 15
- Nahbereich, ii
- Netzwerk, 18
- Newton Verfahren, 25
  
- OMEGA, 16
- Ortsauflösung, 40
- Ortungssystem, 13
  
- Packet Identifikation, 30
- Pascal, 39
- passives Objekt, 14
- PID, 30
- piezoelektrisch, 40
- PLL, 28
- Positioning, 14
- Positionsberechnung, ii
- Positionsbestimmungssystem, 13
- Produktion, 13
  
- Quantisierung, 28
  
- Received Signal Strength, 12
- Rechteckpuls, 42
- Reichweite, 14, 42
- relative Positionsbestimmung, 14
- RF-Signal, 18
- RFID, 15, 17
- Richtcharakteristik, 40
- Robotik, 13, 42
- RSS, 12
  
- Satellitennavigation, 16
- Schalldruck, 39, 40
- Schalldruckpegel, 39
- Schallenergie, 40
- Schallfrequenz, 40
- Schallgeschwindigkeit, 39
  
- Schallquelle, 39
- Schallwelle, 39
- Sender, 13
- Sendsignal, 22, 23
- Sensornetzwerk, 17
- Sichtkontakt, 42
- SIE, 29
- Signalisierung, 18
- Signallaufzeit, 12
- Skalierbarkeit, 14
- Spektrum, 19
- Spitzenwertdetektion, 42
- Spread-Spectrum, 12
- Synchronisierung, 18
- Systemparameter, 15
- Systemzeit, 22, 23
- Szenen Analyse, 15
  
- Tangentenabbildung, 26
- TDC, 27
- TDOA, 18
- Temperatur, 40
- Thread, 37
- Timer, 42
- Tracking, 14
- Transceiver, 17
- Transponder, 17
- Triangulation, 15
- Trilateration, 12, 15, 18
  
- Ultraschall, ii, 12, 39
- Ultraschallempfänger, 17, 18
- Ultraschallimpuls, 18
- Ultraschallsender, 17
- Ultraschallwandler, 40
- universelle Gaskonstante, 39
- USB, 29, 33, 35, 36
- UWB, 19
  
- VID, 35
- Videokamera, 18
- VOR, 15
  
- Wärmeleitung, 40
- Wellenlänge, 39
- Winkelsumme, 25
- WLAN, 17, 18
  
- Zeitdifferenz, ii

Zeitdifferenzmessung, 12

Zeitintervall, 28

Zuverlässigkeit, 15