



# Indoor-Positionierung auf Basis von UWB

J. Blankenbach, Z. Kasmi,  
A. Norrdine, H. Schlemmer

## Ein Lokalisierungsprototyp zur Baufortschrittsdokumentation

Am Geodätischen Institut der TU Darmstadt wird derzeit ein Indoor-Positioniersystem auf Basis von *Ultra Wide Band (UWB)* entwickelt. Das nach dem Trilaterationsprinzip arbeitende System wird in einer Zusammenarbeit mit dem Institut für Baubetrieb der TU Darmstadt sowie der Hochtief AG u.a. zur Positionierung und Orientierung von digitalen Bildaufnahmen auf Baustellen zum Zwecke der Baufortschrittsdokumentation eingesetzt. Der vorliegende Text beschreibt den entwickelten Prototyp sowie die Ergebnisse von ersten Testmessungen.

## 1 Einleitung

Die Bestimmung der zwei oder dreidimensionalen Position einer Person oder eines Objektes innerhalb von Bauwerken oder überbauten Arealen (Indoor-Positionierung) eröffnet für viele Anwendungen ganz neue Möglichkeiten (vgl. BLANKENBACH et al. 2007). Die Fähigkeit zur Positionierung im Innenraum kann aber nicht nur in fertig gestellten Bauwerken, sondern bereits während der Bauphase, z.B. im Zuge der *Baufortschrittsdokumentation*, von Nutzen sein. Ein vom Institut für Baubetrieb der TU Darmstadt entwickeltes modernes Verfahren zur Baufortschrittsdokumentation sieht vor, verortete, digitale Bildaufnahmen mit dem CAD-Modell des Bauwerkes zu verschneiden. So kann nicht nur unmittelbar der Planungs- mit dem Ist-Zustand verglichen werden, sondern es können zudem zahlreiche Dokumentationsinformationen auch detailliert für jedes Bauteil (aktueller Bauzustand, integrierte Versorgungsinfrastruktur etc.) digital erhoben werden.

Eine möglichst automatisierte Verschneidung der Bildaufnahmen mit dem CAD-Modell gelingt aber nur dann, wenn die äußere Orientierung der Bildaufnahmen bekannt ist. Dabei lassen sich mit sechs Parametern (Freiheitsgraden) in Form der drei Koordinatenwerte (X, Y, Z) sowie den drei Rotationswinkeln ( $\omega$ ,  $\varphi$ ,  $\kappa$ ) die Lage des Projektionszentrums sowie die Stellung des Bildes im Objektkoordinatensystem festlegen. Um ein befriedigendes Ergebnis zu erzielen, müssen die Parameter der äußeren Orientierung präzise bekannt sein, und die Bestimmung sollte automatisiert in einer sich ständig wandelnden Umgebung erfolgen. Aufgrund dieser Bedingungen scheiden für die

Bestimmung der äußeren Orientierung viele, auch aus der Geodäsie bekannte, Verfahren von vornherein aus. Eine Möglichkeit zur Lösung des Problems ist der Einsatz eines *aktiven Positionierungssystems*, welches auf der Baustelle installiert wird und mit dessen Hilfe sich die Parameter der äußeren Orientierung bestimmen lassen.

Der vorliegende Artikel beschreibt ein Positioniersystem auf Basis von Ultra Wide Band (UWB), mit dem orientierte Bildaufnahmen für die Baufortschrittsdokumentation erstellt werden können.

## 2 Ultra Wide Band (UWB)

Ultra Wide Band (UWB) stellt eine extrem breitbandige Funktechnologie dar, welche für die Positionierung im Innenbereich eine Reihe positiver Eigenschaften aufweist (vgl. BLANKENBACH et al. 2007). Insbesondere die Möglichkeit zur Erzeugung sehr kurzer elektromagnetischer Impulse erweist sich als großer Vorteil, da dies einerseits eine hohe räumliche Auflösung der Impulse gewährleistet und daraus andererseits die Robustheit von UWB gegenüber Mehrwegeeffekten resultiert. Zudem kann UWB aufgrund der hohen Frequenzdiversität Baumaterialien durchdringen, wodurch die im Innenbereich häufig auftretenden Abschattungseffekte minimiert werden.

### 2.1 UWB-Hardware

Die zentralen Bestandteile des entwickelten Positioniersystems sind die verwendeten *UWB-Transceiver*, als kombinierte UWB-Sende- (Transmitter) und -Empfangseinheiten (Receiver). Das Kernstück jedes Transceivers ist der eingebaute UWB-Chipsatz, der das Versenden und Empfangen von UWB-Signalen nach der Pulsmethode (Impulse Radio, IR) erlaubt. Der vorliegende Chipsatz weist folgende Kenngrößen auf:

- Pulswiederholrate: 9,6 MHz
- Frequenzband: 3,1 – 6,3 GHz
- Sendeleistung: 50  $\mu$ W (– 41 dBm/MHz)
- Abmessungen: 9,0  $\times$  13,5  $\times$  1,0 cm
- Schnittstellen: Ethernet, RS232, SPI.

Eine vereinfachte Darstellung des Aufbaus des Chipsatzes ist in Abbildung 1 gegeben.

Den Hauptbestandteil des Chipsatzes bildet das UWB-Modul mit Basisband- sowie Send- und Empfangsplatine. Das Modul stellt die physikalische Schicht des UWB-Transceivers dar und ermöglicht neben der Daten-

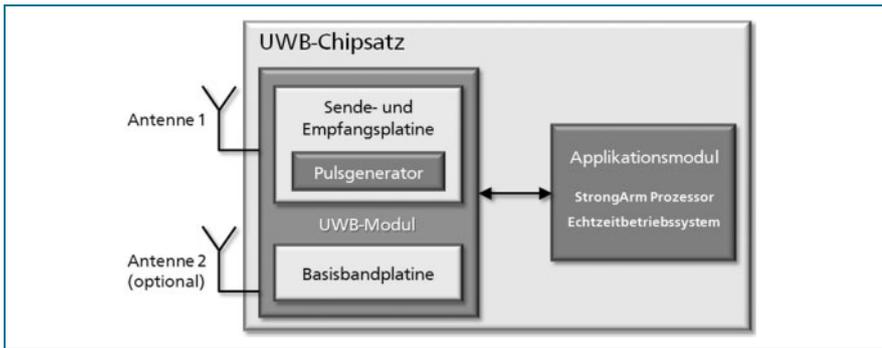


Abb. 1: Aufbau des verwendeten UWB-Chipsatzes

kommunikation auch die Streckenmessung. An das UWB-Modul ist eine Send- und Empfangsantenne angeschlossen, wobei es möglich ist, auch zwei Antennen zu verwenden. Das mit dem UWB-Modul verbundene Applikationsmodul besteht aus einem Mikroprozessor mit dem Echtzeitbetriebssystem VxWorks, so dass eingebettete Anwendungen als so genannte *Tasks* im Transceiver programmiert werden können (Abbildung 7). Für das entwickelte Positioniersystem sind *Tasks* für die Streckenmessungen, Konfiguration des Transceivers und Kommunikation über die UWB-Schnittstelle im Kernel des Mikroprozessors eingebettet.

### 3 Lokales Indoor-Positioniersystem auf Basis von UWB

Basierend auf der UWB-Hardware wurde ein *lokales Indoor-Positioniersystem* (*Indoor Local Positioning System, UWB-ILPS*) entwickelt, dessen Architektur in Abbildung 2 skizziert ist.

Das System besteht aus mehreren UWB-Transceivern, welche mit Hilfe der Laufzeitmessung von UWB-Impulsen die Bestimmung der Raumstrecken zwischen den Geräten ermöglichen. Anhand der Distanzen zwischen den Referenzstationen (RS) mit bekannten Koordinaten  $(X_i, Y_i, Z_i)$  und einer Mobilstation (MS), deren Koordinaten  $(X_N, Y_N, Z_N)$  gesucht werden, lässt sich die unbekannte Position von MS über einen räumlichen Bogenschnitt (Trilateration) bestimmen.

Zur Ermittlung des Aufnahmeortes sowie der Stellung einer Digitalkamera im Raum, wird die MS mit zwei UWB-Transceiverantennen ausgestattet, die an den Enden einer Basis mit bekannter Länge angebracht sind, in deren Mitte die Kamera fest montiert ist (Abbildung 3).

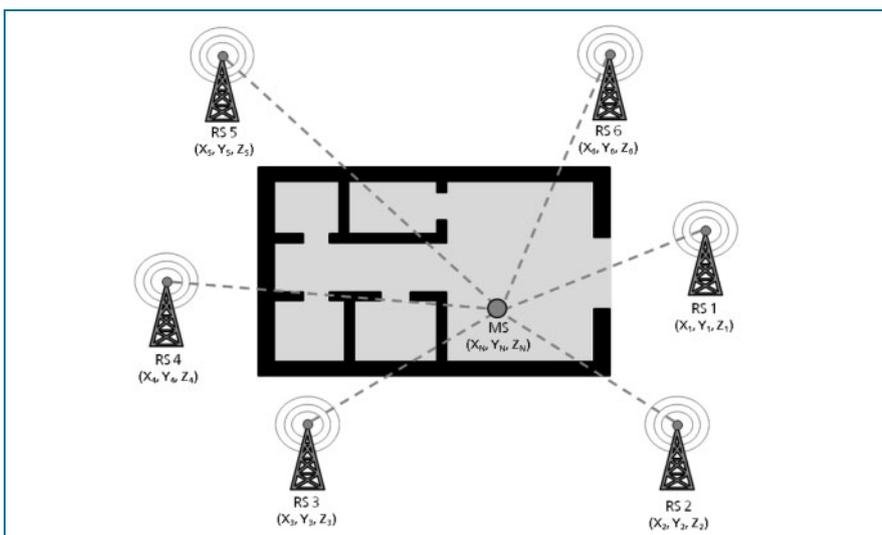


Abb. 2: Systemarchitektur des UWB-ILPS

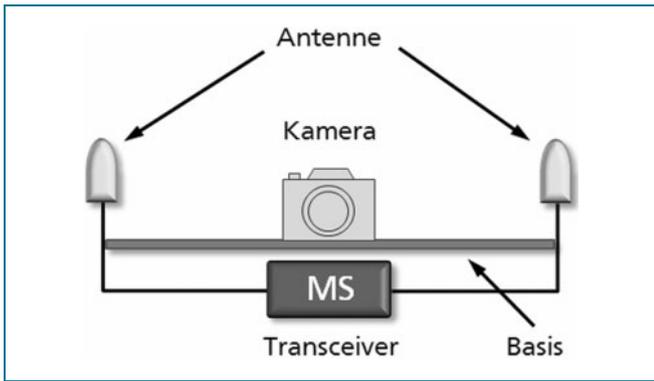


Abb. 3: Messungsaufbau zur Bestimmung der Kameraorientierung

Derart wird sequentiell die Position der beiden Antennen ermittelt, so dass sich aus den beiden Positionsbestimmungen bereits fünf Freiheitsgrade (drei Koordinatenwerte und zwei Rotationswinkel) der Kameraaufnahmen bestimmen lassen. Im Folgenden wird jedoch nur auf die Positionierung einer Antenne eingegangen, da der Vorgang für die zweite Antenne identisch verläuft.

### 3.1 Netzwerkarchitektur des Gesamtsystems

Damit die Kommunikation über die UWB-Schnittstelle möglich ist sind die Transceiver (Stationen) des ILPS in einer beschränkten Mesh-Topologie organisiert (Abbildung 4). Die Stationen können somit direkt untereinander unter „Aufsicht“ eines *Koordinator-Rechners* kommunizieren. Der Koordinator- bzw. Host-Rechner ist ein PC oder PDA, der die Steuerung und Konfiguration aller anderen Stationen, die Netzwerküberwachung sowie die Positionsberechnung übernimmt. Da der Hostrechner keine UWB-fähige Netzwerkkarte besitzt, erfolgt die Kommunikation über ein drahtloses Funknetz (WLAN) nach IEEE 802.11x. Dazu stellt der Hostrechner, ausgestattet mit einem WLAN-Adapter, eine Verbindung mit einem der UWB-Transceiver her, der seinerseits mit einer WLAN-Bridge ausgestattet ist (Abbildung 5). Dieser Transceiver operiert damit als *Masterstation* im UWB-Netzwerk.



Abb. 5: UWB-Transceiver mit aufgesetzter WLAN-Bridge

Aufgrund der späteren Anwendung (Positionierung einer Kamera auf einer Baustelle), die das ILPS unterstützen soll, bietet sich die Mobilstation als Masterstation an. Die Mobilstation ist somit mit dem Hostrechner über eine TCP/IP-Verbindung verbunden, während die UWB-Transceiver untereinander direkt über die UWB-Schnittstelle kommunizieren.

### 3.2 Softwarearchitektur des UWB-ILPS

Zur Durchführung von Streckenmessungen mit anschließender Positionierung werden im UWB-ILPS zwei Typen von Softwareapplikationen verwendet:

- Hostanwendung auf dem Koordinator-Rechner
- Eingebettete Echtzeitanwendung im Applikationsmodul der Transceiver

Das Konfigurieren und Steuern der Transceiver, die Initiierung der Messung sowie die anschließende Positionsberechnung erfolgt in der Hostanwendung auf dem Koordinator-Rechner. Die eingebettete Anwendung auf den Transceivern übernimmt dagegen die eigentliche Distanzmessung zwischen den Geräten. In der Masterstation operiert dabei ein erweiterter Task, da jener zusätzlich die Schnittstelle zum Koordinator-Rechner enthält und somit die Steuer- und Kommunikationsbefehle verarbeiten sowie an die übrigen Transceiver verteilen muss. Abbildung 6 zeigt die Softwarearchitektur des ILPS.

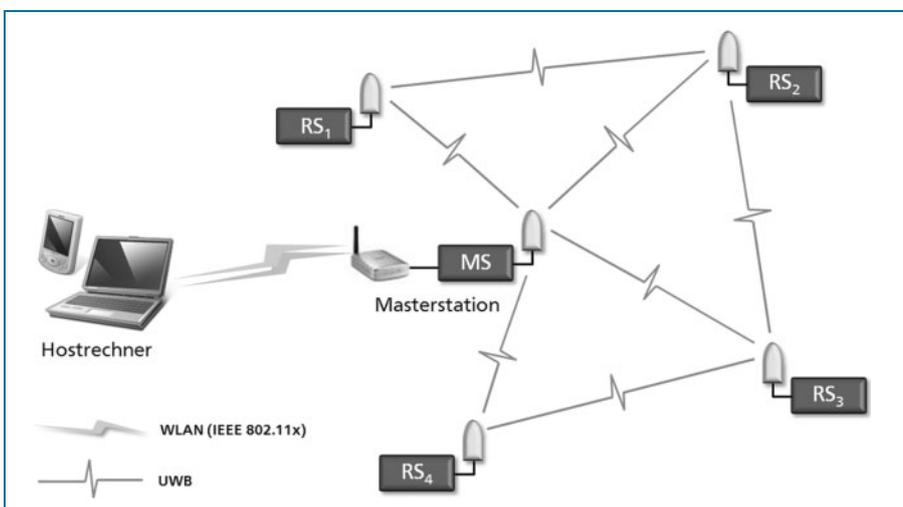


Abb. 4: Netzwerkarchitektur des UWB-ILPS

### 3.3 Kommunikationskonzept im UWB-ILPS

Zur Steuerung der Transceiver und zum Datenaustausch musste ein Kommunikationskonzept implementiert werden. Das Konzept sieht vor, dass über entsprechende Kommunikationsprotokolle *Daten- und Steuerpakete* zwischen den Transceivern bzw. zwischen Transceiver und Hostapplikation ausgetauscht werden. Jedes Paket besteht aus mehreren Blöcken, wobei jeder Block durch einen vordefinierten Datentyp sowie eine vordefinierte Anzahl von Bytes gekennzeichnet ist und einen bestimmten Parameter beschreibt. Somit ist jedes Paket aus zwei Teilen aufgebaut (Abbildung 8):

- Header: enthalten Informationen über den Inhalt und den Pakettyp
- Daten: die eigentlichen Nutzdaten (Parameter)

Mit Hilfe der Pakete kann die Kommunikation zwischen der Hostapplikation und der Masterstation sowie zwischen der Masterstation und allen anderen UWB-Stationen erfolgen.

#### 3.3.1 Kommunikation über die drahtlose Netzwerkschnittstelle (WLAN):

Die Kommunikation der Master-Station mit der Host-Applikation erfolgt über einen Funkadapter (IEEE 802.11x) und somit über TCP/IP. Als Transportprotokoll wurde aufgrund der Echtzeitfähigkeit das *User Datagram Protocol (UDP)* verwendet. UDP hat im Gegensatz zu TCP zwar Nachteile bezüglich der Zuverlässigkeit der Datenübertragung, dafür gestaltet sich der gesamte Kommunikationsablauf wesentlich performanter. Die auftretenden Latenzzeiten bei TCP ergeben sich durch zusätzliche Mechanismen (Verbindungsauf- und -abbau, Flusskontrolle, ...), welche die Datenübertragung verzögern und bei UDP entfallen. Da der Empfang der Pakete bei UDP nicht quittiert wird, wurde als Übertragungskontrolle jedem Paket eine zyklisch polynomische Prüfsumme der Länge von 32-Bit (CRC-32) angefügt.

Derart können verschiedene Pakettypen zur Steuerung, Konfiguration und Messung erstellt werden, von denen beispielhaft die folgenden genannt seien:

- **ParamSetPacket:** setzt die Kommunikations- und Messparameter des Transceivers,
- **RangingStartPacket:** startet eine Laufzeitmessung zur Distanzermittlung,
- **DistanceInfoPacket:** enthält die Messstrecke und weitere Parameter wie beispielsweise die Signalleistung,
- ...

Als Beispiel für ein UDP-Paket zeigt Tabelle 1 den Aufbau des RangingStartPackets.

#### 3.3.2 Kommunikation über die UWB-Luftschnittstelle

Der Informationsaustausch zwischen den Transceivern erfolgt über die UWB-Luftschnittstelle. Das zur UWB-Kommunikation verwendete Protokoll ist eine Implementierung des UWB-Hardwareherstellers und nicht kompatibel zu bekannten Protokollstapeln. Über das proprietäre Kommunikationsprotokoll werden, ähnlich zur Kommunikation zwischen Hostrechner und Masterstation, Steuerbefehle in Form von Paketen versendet. Dabei kapselt die

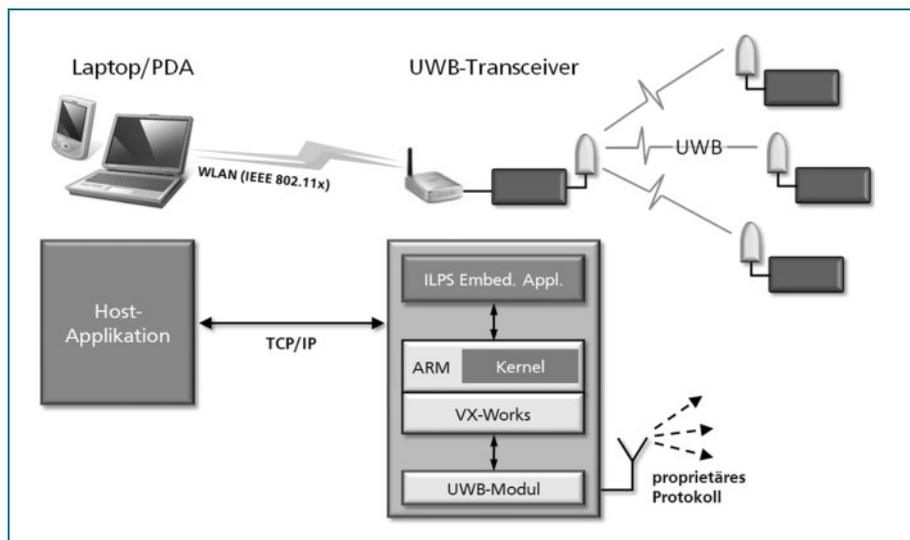


Abb. 6: Anwendungsarchitektur des UWB-ILPS

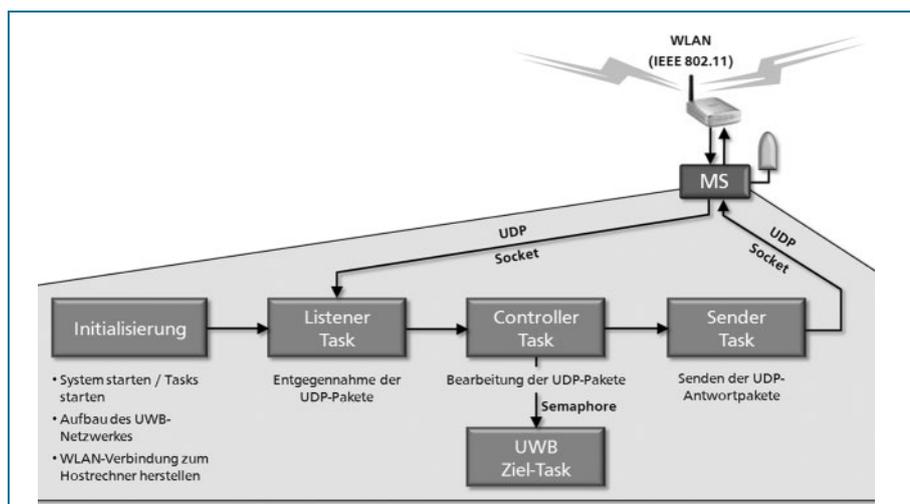


Abb. 7: Tasks im eingebetteten Betriebssystem

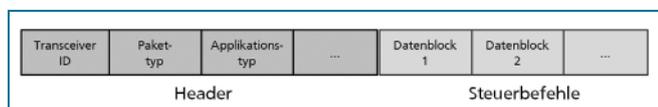


Abb. 8: Ausschnitt des erstellten UWB-Paketes

UWB-Masterstation die Steuerbefehle der Host-Applikation innerhalb neuer Pakete (Abbildung 8), die über einen Rundruf (Broadcast) an alle Transceiver gesendet werden. Die ersten Blöcke im Paket (Header) dienen der Adressierung, so dass der Transceiver frühzeitig erkennt, ob ein

Tabelle 1: Felder eines RangingStart-Paketes

	Parameter	Datentyp	Definition
0	RANGING	UnsignedByte	Pakettyp
1	requester-ID	UnsignedByte	Nummer des Requesters
2	responder-ID	UnsignedByte	Nummer des Responders
3	numRuns	SignedInteger	Maximale Anzahl der zu sendenden Messanforderungen
4	checksum	UnsignedInteger	Prüfsumme für das gesamte Paket

Paket für ihn bestimmt ist, um welchen Pakettyp es sich handelt (Requestpaket, Responsepaket etc.) und welcher Task (Applikationstyp) angesprochen wird. Die darauf folgenden Felder enthalten die eigentlichen Parameter des jeweiligen Steuerbefehls.

## 4 Host-Applikation

Die Host-Applikation auf dem Kontrollrechner wurde in der Programmiersprache Java umgesetzt. Die Host-Applikation kann entweder auf einem PC bzw. Laptop oder als „echte“ mobile Anwendung auf einem PDA betrieben werden. Über eine interaktive grafische Benutzeroberfläche (Graphical User Interface, GUI) steuert der Benutzer die Anwendung (Abbildung 9).

Die Anwendungslogik der Host-Applikation wird durch drei Hauptmodule repräsentiert (Abbildung 10):

- **UWB-Calc:** Das UWB-Calc-Modul enthält die gesamte Logik zur Messdatenverarbeitung, -aufbereitung und Positionsberechnung,
- **UWB-Radio:** Im UWB-Radio-Modul werden die Steuerpakete zur Kommunikation mit den UWB-Transceivern erzeugt. Dazu werden eigene Datentypen durch

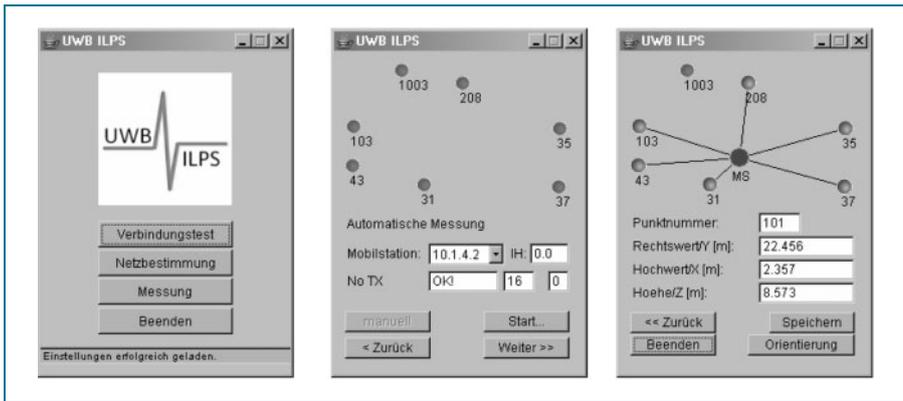


Abb. 9: Grafische Benutzeroberfläche der Hostapplikation

Bitmanipulation in Java erzeugt, die von der eingebetteten Transceiver-Anwendung dekodiert werden können.

- **UWB-Net:** Über das UWB-Net-Modul erfolgen die Verbindungsverwaltung sowie die Datenkommunikation über UDP mit der Masterstation des ILPS.

Der Anwendungsablauf zur Positionierung gestaltet sich damit folgendermaßen:

1. Beim Einschalten des Hostrechners und der UWB-Transceiver wird zunächst automatisch das Netzwerk initiiert. Dabei wird zudem über eine vordefinierte WLAN-Verbindung der Kontakt zwischen Hostrechner und Masterstation hergestellt.
2. Beim Starten der Host-Applikation wird als initialer Schritt eine zentrale Steuerdatei eingelesen, wodurch sämtliche Anwendungsparameter sowie die 3D-Koordinaten der Referenzstationen festgelegt werden.
3. Nachdem die Host-Applikation gestartet ist, kann der Anwender den Messmodus über die GUI auswählen. Hier wird vor Beginn der Messung eine Station als Mobilstation (i.d.R. die Masterstation) ausgewählt sowie weitere Parameter (z.B. Aufbauhöhe) eingegeben. Anschließend kann der nächste Schritt im Messungsvorgang per Knopfdruck eingeleitet werden.
4. Vor der Messung der Distanzen erfolgt die Prüfung der Verfügbarkeit aller Referenzstationen. Es müssen mindestens drei Referenzstationen verfügbar sein, damit eine Positionsbestimmung möglich ist.

5. Ist eine ausreichende Anzahl von Referenzstationen verfügbar, erfolgt die eigentliche Messung der Raumstrecken zwischen der Mobilstation und allen verfügbaren Referenzstationen mit  $n$  Einzelmessungen. Nach jeder Messung zu einer der Referenzstationen erfolgt die Vorauswertung dieser Streckenmessung. Sind Messfehler aufgetreten oder ist die Streuung der Einzelwerte der Messreihe zu groß, wird automatisch eine Wiederholungs- bzw. Nachmessung eingeleitet.
6. Im letzten Schritt, nach der Messung und Vorauswertung aller Einzelmessungen, wird die unbekannte Position der Mobilstation über einen robusten räumlichen Bogenschnitt berechnet.

Die gesamte Messung erfolgt statisch, das heißt die Mobilstation muss für die Dauer des Messungsvorgangs (15 – 30 sec) auf der unbekanntenen Position verbleiben.

## 5 Distanzmessung nach dem TOF-Verfahren

Die eingesetzten UWB-Transceiver ermitteln die Distanz zwischen zwei Geräten nach dem *Time-of-Arrival (TOA)-Prinzip*, bei dem die Distanz zwischen Sender und Empfänger anhand der Laufzeit und der Ausbreitungsgeschwindigkeit der ausgesendeten elektromagnetischen Impulse ermittelt wird. Beim ursprünglichen TOA-Verfahren wird die Distanz einfach gemessen, da ein Signal beim Sender ausgesendet und beim Empfänger empfangen sowie ausgewertet wird. Dazu müssen jedoch Sender und Empfänger zeitlich synchronisiert sein. Bei den vorliegenden Transceivern erfolgt dagegen die Messung der Distanz im Hin- und Rückweg (der Empfänger dient als eine Art Reflektor), wodurch eine gemeinsame (hochgenaue) Zeitbasis für Sender und Empfänger entfällt (*Time-of-Flight, TOF*). Die Reflektorstationen operieren dabei als aktive Repeater, d.h. sie senden das empfangene Signal nach einer ermittelten Zeitverzögerung an den Transceiver zurück.

Die Ermittlung der Laufzeit eines UWB-Signals zwischen zwei Transceivern nach dem TOF-Verfahren erfolgt mit zwei Messungen, einer *Grob-* und einer *Feinmessung* (Abbildung 11).

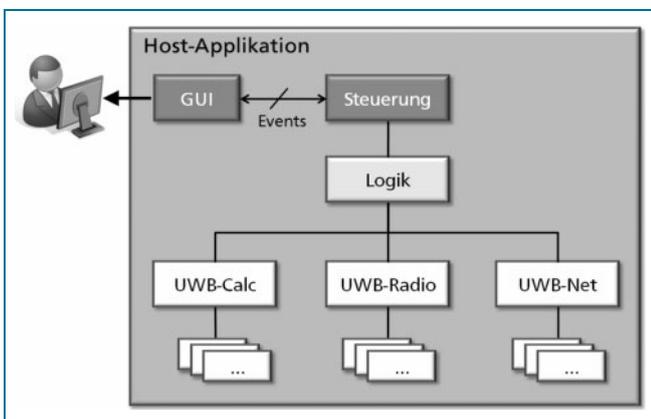


Abb. 10: Aufbau der Hostapplikation auf dem Koordinator-Rechner

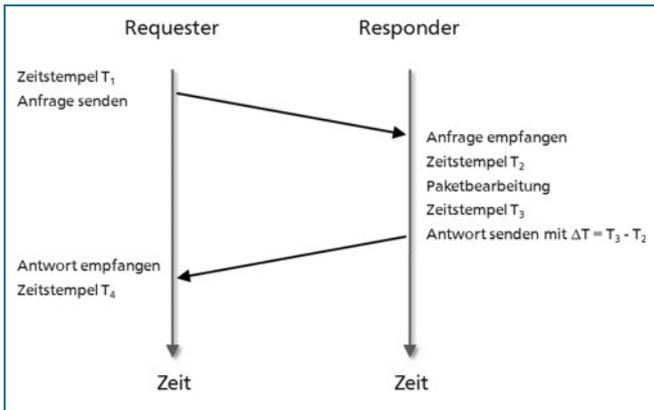


Abb. 11: Distanzmessung auf Basis von UWB

### 5.1.1 Grobmessung

Für die Grobmessung wird ein Transceiver als Sender bzw. Anfragegerät (Requester) und der zweite als Antwortgerät (Responder) konfiguriert.

Der Requester sendet ein Requester-Paket an den Responder und speichert dabei seine aktuelle Systemzeit  $T_1$ . Der Responder antwortet nach erfolgreicher Synchronisation mit einem Responder-Paket und sendet die Bearbeitungszeit des Signals  $\Delta T = T_3 - T_2$  im Responder mit. Der Requester synchronisiert sich mit dem Responder und speichert erneut die momentane Systemzeit  $T_4$ . Die doppelte Laufzeit  $T_0$  zwischen Requester und Responder ergibt sich daraus zu:  $T_0 = T_4 - T_1 - \Delta T$ .

### 5.1.2 Feinmessung:

Für eine exakte Bestimmung der TOF-Zeit des Signals müssen jedoch weitere Korrekturen an die in der Grobmessung bestimmte Laufzeit angebracht werden:

- Innere elektrische Verzögerung:  
Die innere elektrische Verzögerung  $\Delta t_s$  entspricht dem Zeitintervall zwischen der Erzeugung des UWB-Impulses bis zum Verlassen der Antenne. Da die elektrische Verzögerung temperaturabhängig ist, muss sie vor jeder Distanzmessung durch eine Kalibrierungsmessung bestimmt werden.
- Akquisitionszeit:  
Zu Beginn jedes gesendeten UWB-Paketes wird eine Akquisitionspräambel gebildet. Die Akquisitionspräambel ist eine Sequenz von Impulsen, welche die Synchronisation zwischen Requester und Responder ermöglicht. Die Zeit  $t_{Ak}$  zur Erzeugung der Präambel wird Akquisitionszeit genannt.
- Bestimmung der Vorderflanke des Empfangssignals  
Bei der groben Laufzeitmessung wird nur der Zeitpunkt des vom Korrelator detektierten Signals benutzt. Dieses detektierte Signal kann sowohl vom direkten Signal zwischen Sender und Empfänger als auch von einem Mehrwegsignal stammen.  
Um das Problem der Mehrwegausbreitung (Multipath) zu lösen, wird das gesamte Empfangssignal mit einer einstellbaren zeitlichen Auflösung abgetastet. Zur Detektion der Vorderflanke des direkten Signals wird das abgetastete Signal anschließend mit speziellen Flanken-

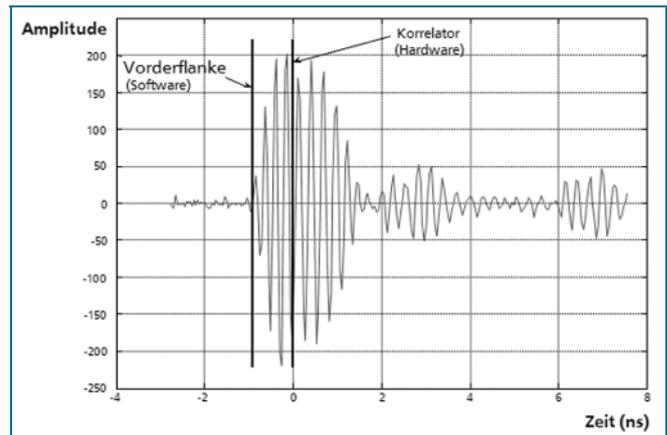


Abb. 12: Bestimmung der Vorderflanke des Empfangssignals

kenerkennungsalgorithmen (Leading Edge Detection, LED) verarbeitet, so dass die Flankenkorrektur  $\Delta t_V$  ermittelt werden kann.

### 5.1.3 Korrektur der Zeitmessung

Mit Hilfe der ermittelten Korrekturen kann nun die endgültige Bestimmung der Laufzeit  $T$  zwischen Requester und Responder nach folgender Gleichung ermittelt werden:

$$T = \frac{T_0 - t_{Ak} - \Delta t_{1s} - \Delta t_{2s} - t_{1V} - t_{2V}}{2}$$

$T_0$ : Unkorrigierte doppelte Laufzeit aus der Grobmessung

$t_{Ak}$ : Akquisitionszeit

$\Delta t_{1s}$  und  $\Delta t_{2s}$ : Innere elektrische Verzögerung im Requester und im Responder

$t_{1V}$  und  $t_{2V}$ : Korrekturen aus der Erkennung der Vorderflanken im Requester und Responder

## 6 3D-Positionsbestimmung

Der zentrale Bestandteil der Softwareapplikation ist das Auswertemodul, das sämtliche Berechnungs- und Auswerteaufgaben in der Anwendung übernimmt.

### 6.1 Vorauswertung

Im Rahmen einer Vorauswertung werden die Rohdaten (Ergebnisse der Einzelmessungen) mittels robuster Datenfilterung von den Ausreißern befreit. Anschließend erfolgt die Schätzung der gemessenen Strecke zwischen MS und der jeweiligen RS als arithmetisches Mittel der gefilterten Einzelmessungen und die Berechnung der Standardabweichung der gemessenen Strecke. Ist die Streuung der Messung zu groß, so kann eine Wiederholungsmessung mit einer höheren Anzahl von Einzelmessungen erfolgen.

## 6.2 Räumlicher Bogenschnitt

Die Berechnung der unbekanntenen Position der MS erfolgt mit Hilfe eines *räumlichen Bogenschnitts*. Für die direkte Lösung des räumlichen Bogenschnitts sind Messungen von der MS zu exakt drei RS notwendig, wobei als Ergebnis zwei Kandidaten für die unbekanntene Position existieren. Durch das Hinzunehmen einer vierten Messung oder durch Einführung einer Bedingung kann eine der Lösungen ausgeschlossen werden.

Da die absolute Genauigkeit der ermittelten Raumstrecken insbesondere zwischen Messungen mit direkter Sichtverbindung (Line-of-Sight, LOS) und ohne Sichtverbindung (None-Line-of-Sight, NLOS) unterschiedlich ist, erfolgt die Auswertung der Messungen bei mehr als drei Referenzstationen nach einem robusten Schätzverfahren (vgl. BLANKENBACH/WILLERT 2008). Derart können bis zu 50 % der einfließenden Strecken systematisch verfälscht sein und dennoch eine gute Schätzung der unbekanntenen Position erfolgen.

## 6.3 Orientierungsberechnung

Die Berechnung der räumlichen Orientierung der Kamera beschränkt sich derzeit auf den Winkel  $\kappa$ , der die Drehung der Kamera um die vertikale Z-Achse beschreibt. Die beiden verbleibenden Rotationswinkel  $\omega$  (Rotation um die X-Achse) und  $\varphi$  (Rotation um die Y-Achse) können zu null gesetzt werden, da die Kamera im vorliegenden Prototyp horizontalisiert wird, so dass keine Drehung um die X- und Y-Achse auftritt. Die Berechnung des Winkels  $\kappa$  kann somit im lokalen kartesischen Koordinatensystem durch eine Richtungswinkelberechnung zwischen den beiden Antennenpositionen an den Enden der horizontalen Basis erfolgen. Zur Verbesserung der Praxistauglichkeit des Messsystems wurde zusätzlich ein zweiachsiger Neigungssensor an die Kamera angebracht. Damit kann die Bedingung einer horizontalen Basis entfallen, da es möglich wird, den Neigungswinkel ( $\omega$ ) und den Kippwinkel ( $\varphi$ ) der Kamera direkt zu messen.

## 6.4 Automatische Netzbestimmung

Zum Betrieb des Gesamtsystems muss zunächst eine Einmessung bzw. Positionierung der Referenzstationen (z.B. mittels Tachymeterinstrument) erfolgen. Da sich die Positionen der Referenzstationen dem Baufortschritt anpassen müssen und es infolge des Baubetriebes zu Veränderungen der Referenzstationsstandpunkte kommen kann, ist eine regelmäßige Positionsbestimmung bzw. -überwachung der Referenzstationskoordinaten unerlässlich. Um die zeitintensiven manuellen Einmessungsarbeiten zu minimieren, wurde daher die Bestimmung der Koordinaten der Referenzstationen in Form einer *automatisierten Netzbestimmung* umgesetzt.

Dazu werden vier im Zielsystem (z.B. im Baustellenkoordinatensystem) bekannte Punkte herangezogen, von denen die Raumstrecken jeweils zu allen Referenzstationen gemessen werden. Anschließend kann „rückwärts“ die unbekanntene Position der Referenzstationen über die bekannten Koordinaten der Baustellenpunkte bestimmt wer-

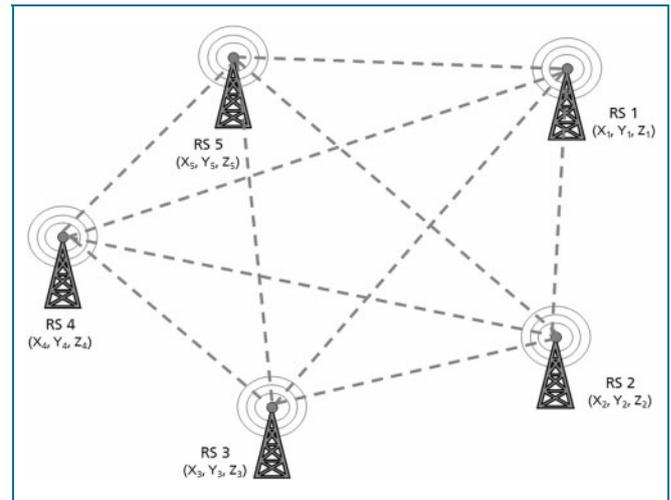


Abb. 13: Streckennetz mit fünf Referenzstationen

den. Das heißt, die Referenzstationen werden als unbekanntene Stationen behandelt, die vier Punkte im Zielsystem dienen als Festpunkte. Liegen zudem Streckenmessungen zwischen den Referenzstationen in (möglichst) allen Kombinationen vor, so kann eine freie 3D-Netzausgleichung des so entstandenen räumlichen Streckennetzes (Abbildung 13) durchgeführt werden, bei dem die direkte Bestimmung der Referenzstationskoordinaten als Näherungswerte eingehen.

Nach der Initialmessung kann so die Überwachung der Referenzstationen nur durch die automatische Messung der Raumdistancen zwischen den Referenzstationen erfolgen. Eine erneute Einmessung ist demnach nur nach dem Umstellen einer oder mehrerer Referenzstationen notwendig, wobei nur die jeweils veränderten Stationen neu zu koordinieren sind. Die Selbstkalibrierung kann zudem genutzt werden, um den Status einer Referenzstation in regelmäßigen Abständen zu überprüfen. So kann im Gesamtsystem ein ausgefallener oder nicht erreichbarer UWB-Transceiver frühzeitig detektiert werden.

## 6.5 Ergebnisse

Mit dem entwickelten Prototyp wurden zunächst umfangreiche Testmessungen in einem speziell angelegten Testfeld des Geodätischen Instituts durchgeführt (Abbildung 14). Hier konnten im Durchschnitt absolute Positioniergenauigkeiten von 5 cm bei unterschiedlichen Messbedingungen (Geometrische Konstellation, LOS/NLOS-Messungen etc.) erreicht werden. Bei guten Bedingungen lassen sich absolute Genauigkeiten von bis zu 2 cm erzielen.

Während zwei Messkampagnen auf der Baustelle des Innovationshauses (inHaus2) der Fraunhofer Gesellschaft in Duisburg wurden Praxismessungen durchgeführt, welche die erzielten Ergebnisse der Testmessungen am Geodätischen Institut bestätigten.



Abb. 14: Testmessung am Geodätischen Institut

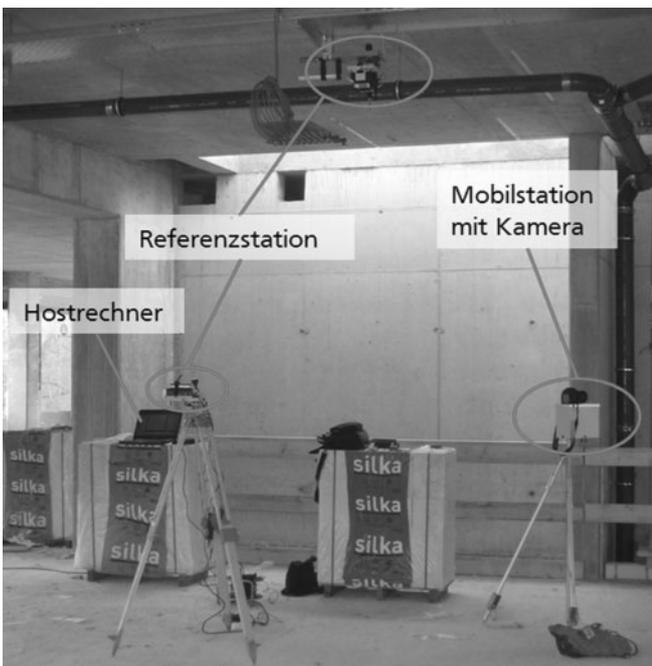


Abb. 15: Messung auf der inHaus2-Baustelle in Duisburg

## 7 Fazit und Ausblick

Die erzielten Ergebnisse unterstreichen das Potenzial der UWB-Technologie für die Positionierung im Indoor-Bereich. Momentan hat die UWB-Hardware vielfach noch prototypischen Charakter, was sich jedoch in absehbarer Zeit ändern sollte. Im Januar 2008 (vgl. BUNDESNETZAGENTUR 2008) wurden von der Bundesnetzagentur die UWB-Frequenzen zwischen 3,1 und 10,6 GHz für den allgemeinen Betrieb freigegeben. Dies lässt darauf vertrauen, dass in Kürze UWB-Hardware auch für den Massenmarkt, ins-

besondere zur drahtlosen Datenübertragung im Nahbereich (Wireless USB), erscheinen werden, wodurch die UWB-Hardware nicht nur preiswerter, sondern auch kompakter werden wird.

Der am Geodätischen Institut entwickelte Prototyp wird derzeit weiterentwickelt. Die Hauptanstrengungen richten sich dabei auf die folgenden Aspekte:

- Weiterentwicklung des robusten Positionieralgorithmus,
- Verbesserung der Netzbestimmung durch Streckenmessung in allen Kombinationen zwischen den Referenzstationen mit anschließender 3D-Netzausgleichung,
- Detektion von NLOS-Messungen,
- Untersuchung der Ausbreitungseigenschaften von UWB in Baumaterialien,
- Verbesserte Integration des Neigungssensors zur Ermittlung aller sechs Freiheitsgrade der Kamera bei freier Aufstellung,
- Verbesserung der ILPS-Software bezüglich der Messgeschwindigkeit für Echtzeitanwendungen,
- Erweiterung des Positionieralgorithmus hinsichtlich kinematischer Messungen.

Ein weiterer Schwerpunkt nachfolgender Arbeiten wird die Integration der Positionierungsergebnisse in andere Systeme und die Fusion mit existierenden Datenbeständen zur Bereitstellung von mobilen Mehrwertdiensten (z.B. OpenLS-Schnittstelle) oder zur Verschneidung mit CAD-Modellen bzw. -Datenbanken (Mixed Reality) sein.

## Quellenverzeichnis

- [1] BLANKENBACH, J.; NORRDINE, A.; SCHLEMMER, H.; WILLERT, V. (2007): Indoor-Positionierung auf Basis von UWB, AVN Heft 5-2007, Wichmann Verlag, Heidelberg
- [2] BLANKENBACH, J.; WILLERT, V. (2008): Robuster räumlicher Bogenschnitt, Ein Ansatz zur Positionsbestimmung in Indoor-Szenarien, im Druck, AVN, Wichmann Verlag, Heidelberg
- [3] BLANKENBACH, J.; MOTZKO, C.; NORRDINE, A.; PFLUG, C.; SCHLEMMER, H. (2008): Indoor Local Positioning System, Abschlussbericht ILPS, TU Darmstadt, unveröffentlicht
- [4] BUNDESNETZAGENTUR (2008): Allgemeinzuteilung von Frequenzen für die Nutzung durch Anwendungen geringer Leistung der Ultra-Wideband (UWB) Technologie, <http://www.bundesnetzagentur.de>
- [5] KASMI, Z. (2008): Weiterentwicklung eines Indoor-Positioniersystems auf der Basis von Ultra-Wide-Band-Verfahren, Diplomarbeit TU Darmstadt, unveröffentlicht

Anschrift der Verfasser:

Dr.-Ing. JÖRG BLANKENBACH, Z. KASMI, Dipl.-Ing. A. NORRDINE, Prof. Dr.-Ing. habil. HARALD SCHLEMMER, Institut für Geodäsie der TU Darmstadt, Petersenstraße 13, 64287 Darmstadt, E-Mail: [blankenbach@geod.tu-darmstadt.de](mailto:blankenbach@geod.tu-darmstadt.de)