

**Ultra-Wideband-Technologie
für den Einsatz im Schwermaschinenbau**

Von der Fakultät
für Georessourcen und Materialtechnik der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften

genehmigte Dissertation
vorgelegt von

Dipl.-Ing.

Kai W. Neumann

aus Bergisch Gladbach

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karl Nienhaus
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Axel Preuße

Tag der mündlichen Prüfung: 09. Dezember 2016

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

**ASRE - AACHENER SCHRIFTEN ZUR ROHSTOFF- UND ENTSORGUNGSTECHNIK
DES INSTITUTS FÜR MASCHINENTECHNIK DER ROHSTOFFINDUSTRIE**

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karl Nienhaus

IMR - Institut für Maschinentechnik der Rohstoffindustrie der RWTH Aachen

Wüllnerstraße 2 • D-52056 Aachen

Tel.: +49 241 80 95680 • Fax: +49 241 80 92311

Internet: www.imr.rwth-aachen.de • E-Mail: info@imr.rwth-aachen.de

1. Auflage Aachen:

Verlag R. Zillekens, 2017

Aachener Schriften zur Rohstoff- und Entsorgungstechnik, Band 91

ISBN: 978-3-941277-30-4

© 2017 Kai W. Neumann

Verlag R. Zillekens

Rainweg 19; 52224 Stolberg

Telefon 02408. 958216; Telefax 02408. 958217

E-Mail: verlag@druckservice-zillekens.de

Gesamterstellung

Druckservice Zillekens

Rainweg 19; 52224 Stolberg

Telefon +49 2408 958216; Telefax +49 2408 958217

www.druckservice-zillekens.de; E-Mail: verlag@druckservice-zillekens.de

Bibliografische Information der deutschen Bibliothek

Die deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der deutschen Nationalbibliografie.

Detaillierte Bibliografische Daten sind im Internet unter <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

D82 (Diss., RWTH Aachen University, 2016)

Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Zeit als Wissenschaftlicher Assistent am Institut für Maschinentechnik der Rohstoffindustrie an der RWTH Aachen entstanden. Daher möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Karl Nienhaus bedanken, der mir die notwendigen Freiheiten ließ, um ein neues Forschungsfeld am Institut zu eröffnen. Weiterhin bedanke ich mich bei meinen Kollegen und Hilfwissenschaftlern am Institut, die mir zu jeder Zeit mit Rat und Tat zur Seite gestanden haben.

Ich bedanke mich bei meiner Frau Marta dafür, dass sie mich in den herausfordernden Zeiten immer unterstützt hat. Ebenso bedanke ich mich bei meinen Eltern und meiner Familie, die mich mit Ihrer Erfahrung und guten Zurede jederzeit an dem Ziel der Promotion haben festhalten lassen.

Herr Univ.-Prof. Axel Preuße danke ich für die Übernahme des Zweitgutachters und Herr Univ.-Prof. Thomas Pretz für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Köln, im Januar 2017

*"Die Schule sollte stets danach trachten,
dass der junge Mensch sie als harmonische Persönlichkeit verlasse,
nicht als Spezialist."*

Albert Einstein

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen der Positionsbestimmung	5
2.1	Funkbasierte Positionsbestimmung	5
2.1.1	Begriffe und Definitionen	6
2.1.2	Verfahren zur Positionsbestimmung	8
2.1.3	Implementierungen von Time-of-Arrival Verfahren	10
2.2	Multilateration	16
2.3	Dilution of Precision (DOP)	18
2.3.1	Einfluss von Fehlern in der Entfernungsmessung	18
2.3.2	Einfluss der geometrischen Konfiguration des Messsystems	22
3	Stand der Technik und Forschung	25
3.1	Technologische Unterscheidung von Positioniersystemen	26
3.2	Produkte am Markt	27
3.2.1	UCAS-430 (Becker Mining Systems)	28
3.2.2	LPR(r) (Symeo)	28
3.2.3	indurad Positionslösungen	28
3.2.4	MineStar™ (Caterpillar)	29
3.2.5	LaseBTL (Lase)	29
3.2.6	Jigsaw Positioning System (Locata / Leica)	30
3.3	Stand der Forschung	30
3.3.1	Signalstärke-basierte Ortung	31
3.3.2	ZigBee-basierte Positionierung	33
3.3.3	Inertiale Positionsbestimmung	34
3.3.4	FEATureFACE	34
3.3.5	OPTI-MINE	35
4	Entwicklung eines UWB-Positionsbestimmungssystems für die Schwer-	
	industrie	37
4.1	Einführung in die Ultra-Wideband (UWB)-Funktechnologie	37
4.1.1	Historische Entwicklung	37
4.1.2	Technische Grundlagen der UWB-Funktechnologie	39
4.1.3	Anwendungen der UWB-Technologie	42
4.2	Bewertung der UWB-Funktechnologie für die Nutzung in der Schwer- maschinenindustrie	42

4.3	Verfügbare UWB-Systeme	44
4.3.1	TimeDomain P410 Ranging and Communication Module	44
4.3.2	Decawave DW1000 ScenSor-Chip	48
4.4	Kalibrierung von UWB-Systemen	51
4.4.1	Einfluss der Antennenverzögerung	52
4.4.2	Durchführung der Antennen-Kalibration	53
4.5	Implementierung des Positioniersystems	54
4.5.1	Anforderungen	54
4.5.2	Hardware	55
4.5.3	Software	59
4.6	Optimierung der Positionsbestimmung durch Filterung	61
4.6.1	Mittelwertfilter	62
4.6.2	3-Sigma-Filter	63
4.6.3	Kálmán-Filter	63
4.6.4	Anwendung der Filterung	64
5	Funktionsprüfungen und Testmessungen	65
5.1	1D Labormessung P410	65
5.2	3D Statische & dynamische Labormessungen P410	66
5.3	Freifeldmessungen P410 und EVB1000	71
6	Fallstudien zur Implementierung im Schwermaschinenbau	75
6.1	Positionsbestimmung eines Schaufelradbaggers am Kohlenmischplatz	75
6.1.1	Ziel der Messung	75
6.1.2	Messaufbau	76
6.1.3	Durchführung	77
6.1.4	Ergebnisse	78
6.2	Positionsbestimmung eines Bunkerentladewagens im Kohlenbunker .	80
6.2.1	Ziel der Messung	80
6.2.2	Messaufbau	81
6.2.3	Durchführung	83
6.2.4	Ergebnisse	84
6.3	Positionsbestimmung zwischen Bandschleifenwagen und Zwischen- wagen	84
6.3.1	Ziel der Messung	84
6.3.2	Messaufbau	85
6.3.3	Durchführung	87
6.3.4	Ergebnisse	87
6.4	Einsatz zur untertägigen Positionsbestimmung	89
6.4.1	Ziel der Messung	89
6.4.2	Messaufbau	90
6.4.3	Durchführung	91
6.4.4	Messergebnisse	93
6.4.5	2D/3D-Positionsbestimmung	95

7 Erhöhung der Prozesssicherheit	99
7.1 Prozesssicherung & Zuverlässigkeit	99
7.2 Zuverlässigkeitsbetrachtung am Beispiel eines Betonspritzgerät- Auslegers	101
7.2.1 Zuverlässigkeit mit Dreh-/Lineargebern	101
7.2.2 Zuverlässigkeit mit UWB-Positioniersystem	103
7.2.3 Zuverlässigkeit beider Systeme im Verbund	104
7.3 Funktionale Sicherheit	105
7.4 Zündschutz in explosiven Atmosphären	108
7.4.1 Grundlagen des Explosionsschutzes	108
7.4.2 Konstruktive Maßnahmen	109
8 Zulassung von UWB-Systemen in Deutschland und der Welt	113
8.1 Zulassungsrichtlinien in Deutschland und im europäischen Ausland .	113
8.2 Zulassungsrichtlinien in den USA	117
9 Zusammenfassung und Ausblick	119
Akronyme	123
Abbildungsverzeichnis	127
Tabellenverzeichnis	129
Literaturverzeichnis	131

1 Einleitung

Die Mechanisierung des Bergbaus ist abgeschlossen und in allen Ländern verfügbar. Die nächste Herausforderung ist die Automatisierung. Mit diesen zwei Sätzen kann man den Stand der Technik in der Rohstoffindustrie derzeit weitestgehend zusammenfassen⁽ⁱ⁾. Die Entwicklung zur Mechanisierung der sowohl über- als auch untertägigen Gewinnung war bereits gegen Ende des letzten Jahrhunderts vollzogen, sodass nur noch geringe Leistungssteigerungen durch weiterentwickelte Mechanisierungskonzepte zu erwarten sind. Bedingt durch die immer leistungsfähigeren Computersysteme und deren proportional steigende Fähigkeit, Daten zu verarbeiten und zu aggregieren, ist die Automatisierung der Betriebsmittel im Bergbau seit den 1990er Jahren das Fernziel.

Angelehnt an die Entwicklung der führenden Industrienationen in Richtung *Industrie 4.0* haben auch der Bergbau und die Schwerindustrie das Potential dieser Vision entdeckt. Die Digitalisierung der Mine ist für viele Unternehmen im Bergbau das große Thema der Zukunft. [1] [2]

Diese Digitalisierung ist offensichtlich vielschichtig, wie man an den vielen unterschiedlichen und unabhängigen Prozessen in einer modernen Mine erkennen kann: angefangen bei der Gewinnung, dem Transport und der Analyse des Materials, der Aufbereitung, der Qualitätssicherung, der Verladung und parallel zu allem dem wiederholten Ablegen und Aufnehmen von Material. Dabei ist ein Kernpunkt für die Automatisierung von mobilen Betriebsmitteln die Kenntnis der Umgebung der zu automatisierenden Maschinen. Dies führt unweigerlich zu der Frage der Positionsbestimmung. Ein mobiles Betriebsmittel lässt sich nur dann sinnvoll automatisieren, wenn zu jeder Zeit eine zuverlässige Kenntnis seiner Position vorliegt.

Um diese Positionsbestimmung zu erreichen werden in der Schwerindustrie verschiedene Systeme eingesetzt (vgl. Kapitel 3). Doch diese Systeme funktionieren in der Praxis alles andere als ideal. Die Gründe hierfür sind vielfältig und stark vom Einzelfall abhängig. Es ist klar erkennbar, dass in der Entwicklung von neuen, besseren Positionsbestimmungssystemen ein großes Marktpotential liegt und eine große

⁽ⁱ⁾Diese Aussage ist auf den derzeitigen Stand der Technik/Forschung bezogen und stellt nicht zwangsweise die technische Realität in der Praxis aller Bergbauländer der Welt dar.



Nachfrage an diesen besteht. [3]

Für die Positionsbestimmung wird häufig GPS eingesetzt. Doch in vielen Fällen ist die Genauigkeit nicht hoch genug bzw. die Abdeckung schlecht. Im Tagebau ist der Empfang des GPS-Signals auf den unteren Sohlen bereits so schlecht, dass eine Positionsbestimmung nur sehr ungenau möglich ist. Untertage ist ohnehin kein GPS-basiertes System einsetzbar. In Industrieanlagen ist eine GPS-basierte Positionsbestimmung ebenfalls oft schwer möglich, da sich das Betriebsmittel oft nicht unter freiem Himmel befindet. In all diesen Fällen muss ein von GPS unabhängiges Positionsbestimmungssystem installiert werden. Dieser Bedarf wurde von der Industrie erkannt und es wird derzeit nach geeigneten Lösungen gesucht. [4]

In der Vergangenheit wurden verschiedene Verfahren und Technologien entwickelt und es wurde versucht, diese auf die Schwerindustrie zu übertragen. Hierzu zählt unter anderem das Received Signal Strength (RSS)-Verfahren, welches in der Industrie breite Verwendung findet, jedoch hinter seinen Leistungsversprechen zurück bleibt. Weiterhin werden verschiedene Funktechnologien um Funktionen zur Ortung erweitert (WLAN, ZigBee, Rubees, ...), jedoch erlauben diese Technologien aufgrund ihrer technologischen Beschaffenheit keine Positionsbestimmung mit cm-Genauigkeit. Im untertägigen Einsatz verschlechtert sich ihre Genauigkeit zudem derart, dass keine robuste und exakte Positionsbestimmung möglich ist. Diese Verfahren eignen sich vielmehr dazu, eine grobe Schätzung einer Position zu erreichen. [5] [6] [7]

Unabhängig von der Aufgabe der Positionsbestimmung ist die Datenübertragung zweifelsfrei ein weiterer integraler Bestandteil der Digitalen Mine. Nur durch einen robusten, hoch verfügbaren und leistungsfähigen Datenkanal können die Informationen, welche zum automatischen Betrieb notwendig sind, zuverlässig übertragen werden. Für diese Aufgabe existieren viele Systeme, welche ihre Aufgabe zuverlässig erfüllen. Wenn jedoch ein Positioniersystem ebenfalls zur Datenübertragung geeignet wäre, könnte sich der Betreiber ein weiteres System sparen, und so die Komplexität und die (Betriebs-)Kosten senken.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein neuartiges Positioniersystem vorgestellt, welches auf der UWB-Technologie basiert. Die Vorteile eines solchen Systems vermögen das Lösen der Probleme der oben genannten existierenden Systeme. In Kapitel 2 werden die Grundlagen erläutert, welche zum Verständnis von Positioniersystemen notwendig sind. Kapitel 3 zeigt den aktuellen Stand der Technik für Positioniersysteme auf und diskutiert Vor- und Nachteile der entsprechenden Systeme. Darüber hinaus wird auch der Stand der Forschung beschrieben. Nach dieser Grundlagenanalyse erklärt Kapitel 4 die UWB-Funktechnologie und geht auf die geleistete Entwicklungsarbeit

für das neue Positionsbestimmungssystem ein. Anschließend werden in Kapitel 5 (Labor-)Messungen aufgeführt, mit welchen die Leistungsfähigkeit des Systems getestet wurden. Kapitel 6 beschreibt Feldmessungen, welche an realen Maschinen und Applikationen installiert wurden. Dieses Kapitel gibt Aufschluss über die möglichen Einsatzszenarien des entwickelten Systems. Kapitel 7 geht auf Aspekte der (Prozess-)Sicherheit ein und zeigt auf, wo das neue Positionsbestimmungssystem in diesem Kontext einen Mehrwert darstellen kann. Anschließend gibt Kapitel 8 einen Überblick über die Zulassung von UWB-Systemen in Deutschland, der EU und den USA. Dieser Überblick dient vor allem der Identifizierung von notwendigen Voraussetzungen, um das Positioniersystem vermarkten zu können. Kapitel 9 schließt mit einer Zusammenfassung der geleisteten Arbeit und einem Ausblick auf kommende Entwicklungen ab.



2 Grundlagen der Positionsbestimmung

In diesem Kapitel werden Grundlagen eingeführt, auf denen das entwickelte Positionsbestimmungssystem aufbaut. Auf diesen Grundlagen basieren Positionsbestimmungssysteme im Allgemeinen und bereits die Grundlagen zeigen auf, was die Herausforderungen in der Praxis sind. Die Unterabschnitte in diesem Kapitel bauen aufeinander auf.

2.1 Funkbasierte Positionsbestimmung

Positionsbestimmung beschreibt den Vorgang, die (zuvor meist unbekannte) Position eines Objekts in einem bestimmten Bezugskordinatensystem zu einem bestimmten Zeitpunkt zu ermitteln. Im Folgenden wird auf die funkbasierte Positionsbestimmung eingegangen⁽ⁱ⁾. Um einige nötige Begriffsdefinitionen einzuführen, wird zuerst ein minimales Anschauungsbeispiel gewählt. Als einfachstes Beispiel wird die eindimensionale Positionsbestimmung betrachtet. Im Anschluss wird auf die einzelnen Methoden eingegangen.



Abbildung 2.1: Prinzipieller Aufbau einer 1D-Positionsbestimmung.

Das mobile Objekt, dessen Position ermittelt werden soll, ist hier auf der rechten Seite zu sehen. Es fährt z.B. auf einer Schiene und hat einen Bewegungsradius, welcher durch die Applikation vorgegeben ist. Um die Position des Objekts auf der Schiene zu ermitteln, seien sowohl auf dem mobilen Objekt als auch an einer nicht-beweglichen Stelle neben der Strecke Geräte installiert, welche es erlauben, die Entfernung untereinander zu ermitteln. Durch diese Entfernungsmessung kann eine Positionsbe-

⁽ⁱ⁾Im Gegensatz zu drahtlosen Systemen gibt es Systeme, welche eine mechanische Verbindung zum zu bestimmenden Objekt benötigen



stimmung durchgeführt werden: Die Entfernungsmessung gibt Aufschluss darüber, wie weit das mobile Objekt vom fest installierten Gerät entfernt ist. Durch diese Information kann die relative Position des mobilen Objekts auf der Schiene ermittelt werden. Angenommen, die Strecke sei in einem Bahnhof verlegt, dann kann durch Kenntnis der relativen Position der Strecke im Bahnhof nun auch die Position des Objekts im Bahnhof berechnet werden. Dies kann beliebig weiter geführt werden (Position in der Stadt, in der Region, im Land, ...).

2.1.1 Begriffe und Definitionen

Die folgenden Begriffe und Definitionen werden im Rahmen dieser Arbeit verwendet.

2.1.1.1 Positionsbestimmung / Ortung

Der Begriff Positionsbestimmung bzw. Ortung beschreibt den Vorgang, die Position eines Objekts in einem bestimmten Bezugskoordinatensystem zu ermitteln. Die Position des Objekts ist im Vorhinein zumeist unbekannt. Sie kann aber durchaus bekannt sein, oder es kann eine ungenaue Schätzung der Position vorliegen. In jedem Fall soll durch die Positionsbestimmung eine genauere Ermittlung der Position erreicht werden. In der Literatur werden die Begriffe Ortung und Positionsbestimmung häufig synonym verwendet.

2.1.1.2 Tag (engl.)

Der Tag ist ein Gerät auf dem zu positionierenden Objekt, welches zur Positionsmessung erforderlich ist. Häufig wird dieser Begriff im Kontext der Positionsbestimmung synonym für das gesamte Objekt verwendet. Dies liegt darin begründet, dass durch Kenntnis der Position des Tags gleichzeitig auch die Position des Objekts bekannt ist, da der Tag normalerweise fest auf dem Objekt installiert wird. Im obigen Beispiel ist der Tag durch die Antenne auf dem Objekt, welches sich auf der Schiene bewegt, dargestellt.

2.1.1.3 Anker

Anker bezeichnet ein fest installiertes Gerät, welches zur Positionsermittlung dient. Die Anker stellen die Referenzobjekte dar, zu welchen die Position eines Tags be-

rechnet werden kann. Bei GPS z.B. stellen die Satelliten diese Anker dar. Im obigen Beispiel ist das Gerät neben der Strecke ein Anker. Je nach Anwendung werden mehrere Anker benötigt.

2.1.1.4 Mehrdimensionale (nD) Positionsbestimmung

Das nD bezeichnet hier die Dimension der Positionsbestimmung in der vorliegenden Anwendung. Für $n = 1$ ergibt sich die 1D-Positionsbestimmung, wie sie im obigen Beispiel Verwendung findet.

2.1.1.5 Absolute / relative Positionsbestimmung

Eine durchgeführte Positionsbestimmung ist per se immer relativ. Die ermittelte Position bezieht sich auf das Bezugssystem, in welchem die Position errechnet wurde. Dies ist meist jenes System, in welchem die Positionen der Anker vorliegen. Durch die Transformation der Position (Hochaggregation) in das nächst höhere Bezugssystem kann die Position auf quasi-absoluter Ebene erreicht werden. Die Position des Auslegers eines Braunkohlebaggers bezogen auf den Bagger selbst ist relativ. Die Position des Baggers im Tagebau hingegen kann als absolut angesehen werden. Die Festlegung, ab wann eine Position als absolut gilt, ist jedoch von der Anwendung und der Betrachtungsweise abhängig.

2.1.1.6 Tracking

Ein in diesem Kontext häufig auftretender Begriff ist das Tracking. Es bezeichnet nicht - wie häufig fälschlich verwendet - die Positionsbestimmung, sondern baut vielmehr auf dieser auf. Tracking bezeichnet den Vorgang des kontinuierlichen Positionierens und Nachverfolgens des Objekts. Zu der räumlichen Dimension der Position kommt also die zeitliche Dimension hinzu.

2.1.1.7 (Non-) Line-of-Sight

Der Begriff Line-of-Sight beschreibt dem Umstand, dass die Sichtlinie zwischen Tag und Ankern frei ist. Unter Line-of-Sight-Bedingungen ist die Qualität der Messergebnisse naturgemäß um ein Vielfaches besser als unter Non-Line-of-Sight-Bedingungen. Im Rahmen dieser Arbeit wird nur auf Applikationen eingegangen, in welchen Line-of-Sight standardmäßig gegeben ist.



2.1.2 Verfahren zur Positionsbestimmung

Der vorige Abschnitt hat die grundlegenden Definitionen erläutert, welche im Kontext der funkbasierten Positionsbestimmung verwendet werden. Dieser Abschnitt beschreibt nun gebräuchliche Verfahren, welche diese Positionsbestimmung ermöglichen.

2.1.2.1 Signalstärkemessung

Die Reichweite eines jeden Funksystems ist begrenzt. Dies liegt an der Dämpfung, die ein ausgesendetes Signal während seiner Laufzeit zum Empfänger erfährt. Dieser Umstand kann dahingehend genutzt werden, dass die Signalstärke am Empfänger Aufschluss über die Entfernung zum Sender geben kann. Durch den Einfluss von Umgebungsparametern, welche nicht kontrolliert werden können, ist die Dämpfungscharakteristik eines Funksignals allerdings im Allgemeinen unbekannt und nicht deterministisch. Die erreichbare Genauigkeit ist daher relativ gering (für Details siehe Abschnitt 3.3.1).

2.1.2.2 Angle-of-Arrival

Durch die Ermittlung der Empfangsrichtung eines Signals an mehreren Empfängern kann beim Angle-of-Arrival (AoA)-Verfahren ebenfalls eine Position ermittelt werden. Im Falle von zwei Empfängern kann bei Kenntnis der beiden Einfallswinkel eines Signals auf die Position des Senders geschlossen werden (Abbildung 2.2). Der Tag auf dem Mobilteil sendet ein Signal aus, welches von mindestens zwei Antennen an der Basisstation empfangen wird. Durch den Laufzeitunterschied der Wellenfronten, die an der Basis ankommen, kann auf den Winkel α der einlaufenden Welle geschlossen werden.

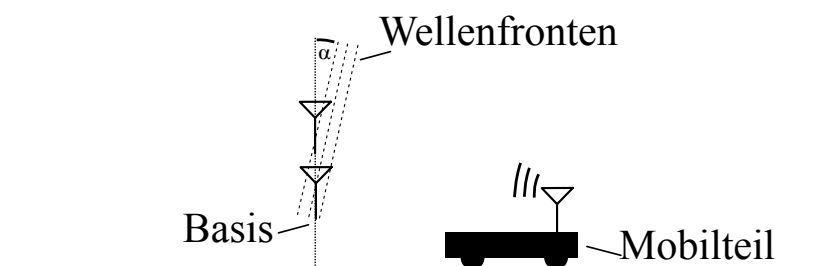


Abbildung 2.2: Funktionsweise des Angle-of-Arrival-Verfahrens.

2.1.2.3 Time-of-Arrival / Time-of-Flight

Beim Time-of-Arrival (ToA)-Verfahren (oft auch als Time-of-Flight (ToF)-Verfahren bezeichnet) besitzen die zur Positionsbestimmung verwendeten Geräte spezielle Sender und Empfänger, welche eine exakte Zeitmessung empfangener und gesendeter Signale erlauben. Hierdurch wird es möglich, die Zeitdifferenz zwischen dem Sendevorgang am Sender und dem Empfangsvorgang an einem Empfänger zu bestimmen. Diese Zeitdifferenz t_p entspricht der Signallaufzeit und im Fall von Line-of-Sight der direkten Distanz zwischen Sender und Empfänger (Abbildung 2.3). Auf die

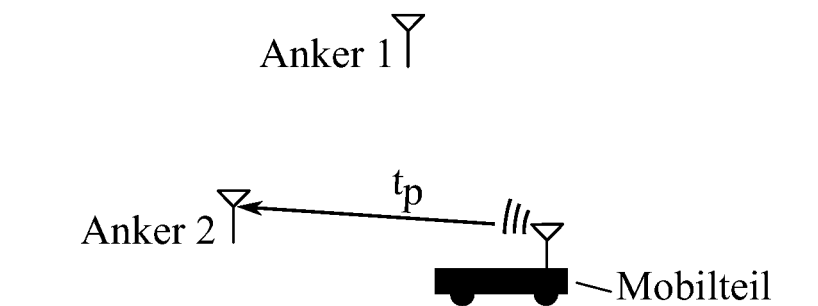


Abbildung 2.3: Funktionsweise des Time-of-Arrival-Verfahrens.

Entfernung zwischen Sender und Empfänger kann (durch Kenntnis der Ausbreitungsgeschwindigkeit c elektromagnetischer Wellen) direkt geschlossen werden:

$$d = \frac{t_p \cdot c}{2} \quad (2.1)$$

Ein Problem dieses Verfahrens ist, dass die Uhren auf allen Sendern und Empfängern synchronisiert sein müssen. Dies kann entweder durch eine separate Synchronisierung der Uhren gewährleistet werden oder durch spezielle Verfahren zur Entfernungsmessung, welche durch Mehrfachübertragungen diese Synchronisierung umgehen (siehe Kapitel 2.1.3). Die Genauigkeit der Zeitmessung ist von höchster Bedeutung, da selbst kleinste Ungenauigkeiten in der Zeitmessung zu einem hohen Fehler in der Messung führen. Für einen zeitlichen Fehler von 10 nsec ergibt sich nach obiger Formel bereits ein Fehler in der Entfernung von 1,5 m.

2.1.2.4 Time-Difference-of-Arrival

Im Gegensatz zum ToA-Verfahren wird beim Time-Difference-of-Arrival (TDoA)-Verfahren nicht die Laufzeit eines Signals zwischen einem Sender und einem Empfänger ermittelt, sondern die Differenzen der Laufzeit eines Signals zwischen einem



Sender und mehreren Empfängern (Abbildung 2.4). Durch die (zwingend erforderliche) Synchronisierung der Anker wird der Empfangszeitpunkt aller Anker in eine zeitliche Relation gesetzt. Eine Synchronisation des Tags zu den Ankern ist jedoch nicht notwendig. Dies bietet den Vorteil, dass hierbei nicht Schnittpunkte von mehre-

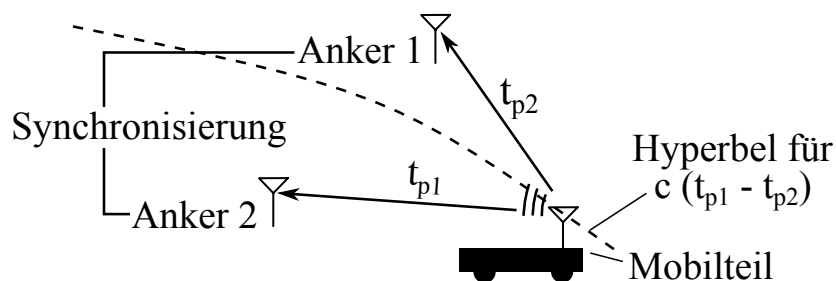


Abbildung 2.4: Funktionsweise des Time-Difference-of-Arrival-Verfahrens.

ren Kreisen, sondern von Hyperbeln berechnet werden. Das liegt darin begründet, dass die Differenz der beiden Laufzeiten nicht auf einem Kreis verläuft, sondern einer Hyperbel folgt. Aufgrund der geometrischen Beschaffenheit dieses Problems erreicht das Verfahren eine höhere Genauigkeit. Die erforderliche Synchronisation stellt jedoch einen nicht unerheblichen Aufwand dar. Zwar ist dieser geringer als die Synchronisation von Sender und Empfänger beim ToA-Verfahren, da die Synchronisation der Anker rein kabelgebunden erfolgen kann, jedoch kann durch geeignete Implementierung des ToA-Verfahrens auch ohne Synchronisation eine wesentliche Verbesserung der Messergebnisse erzielt werden. Dies wird im folgenden Abschnitt beschrieben.

2.1.3 Implementierungen von Time-of-Arrival Verfahren

Im vorherigen Abschnitt wurden verschiedene Methoden zur Positionsbestimmung vorgestellt. Das im Rahmen dieser Arbeit wichtigste Verfahren ist das ToA-Verfahren. Wie beschrieben wurde, stellt jedoch die Synchronisation der Sender und Empfänger eine große Hürde dar. Diesem Umstand kann durch geeignete Sende- und Empfangsmuster Sorge getragen werden, sodass auch ohne komplizierte Synchronisation eine taugliche Ergebnisqualität erzielt werden kann. Der Grund für die benötigte Synchronisation ist die Tatsache, dass alle beteiligten elektrischen Systeme von einem Taktgeber (Quarz) abhängen und die Frequenz jedes Quarzes im Betrieb driftet. Zusätzlich weist jeder Quarz individuelle Schwankungen und Ungenauigkeiten auf. Um die Zeitdifferenz zwischen Sende- und Empfangszeitraum zu bestimmen, müssen beide Zeiten im selben Zeitsystem gemessen worden sein. Dies ist jedoch im

vorliegenden Fall nicht gegeben: Der Sendezeitpunkt wird vom Tag gemessen, der Empfangszeitpunkt vom Anker. Weiterhin ist nicht nur der initiale Offset (also die statische Verschiebung der Zeitbezugssysteme) von Interesse: Da die Quarze eines jeden elektrischen Systems im laufenden Betrieb Schwankungen unterworfen sind, muss diese Synchronisation dauerhaft erfolgen. Dies wirkt sich negativ auf die Gesamtleistung des Systems aus, da diese Synchronisation auf dem kontinuierlichen Austausch von Betriebsparametern der einzelnen Module basiert. Der Austausch findet im Idealfall über das Funkmedium statt, wodurch das Medium jedoch für andere Übertragungen blockiert wird und nicht für die eigentliche Aufgabe genutzt werden kann. Im Folgenden sollen die zwei wichtigsten Verfahren vorgestellt und der oben beschriebene Umstand näher erläutert werden.

2.1.3.1 Two-Way-Ranging

Beim Two-Way-Ranging (TWR)-Verfahren werden für eine Entfernungsmessung zwei Laufzeitmessungen durchgeführt. Nach diesen Messungen liegt das Ergebnis der Entfernungsmessung auf jener Seite vor, welche die Messung angestoßen hat (Abbildung 2.5). Die round-trip-time (RTT) (die Zeit, bis das Signal wieder am Sender

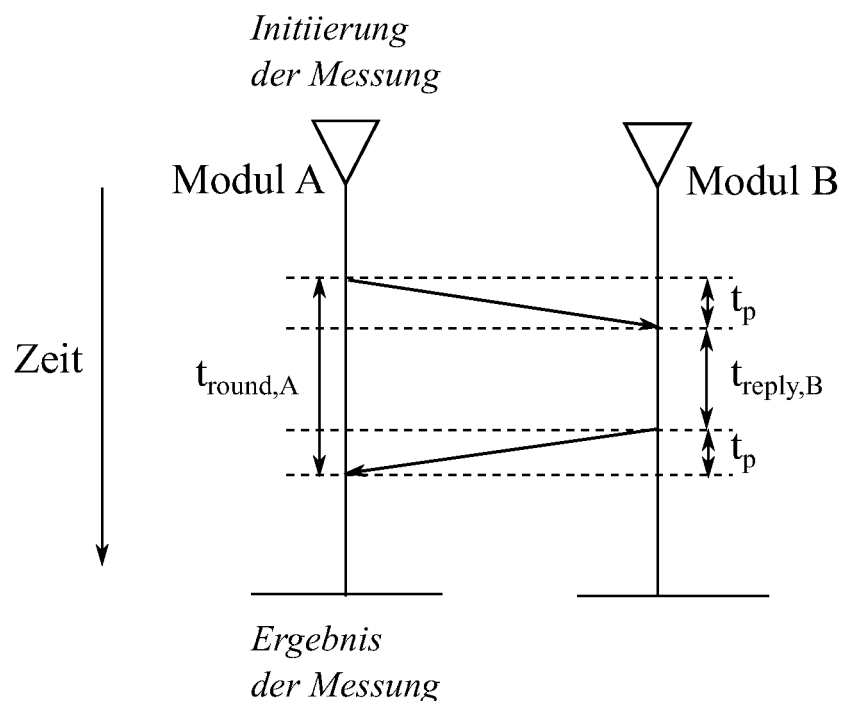


Abbildung 2.5: Das Two-Way-Ranging-Verfahren.



ankommt) für eine Messung vom Modul A aus gesehen beträgt

$$t_{round,A} = 2 \cdot t_p + t_{reply,B}. \quad (2.2)$$

Die Zeit $t_{reply,B}$ bezeichnet die Antwortzeit des Empfängers, bevor er das Signal wieder zum Sender zurück sendet. Für die Laufzeit t_p gilt danach beim TWR-Verfahren

$$\Rightarrow t_{p,TWR} = \frac{t_{round,A} - t_{reply,B}}{2}. \quad (2.3)$$

Die Ungenauigkeiten der Quarze für das Modul A und das Modul B seien nun jeweils mit den Faktoren δ_A respektive δ_B unbekannt, aber konstant. Diese Vereinfachung soll hier angenommen werden, um die Grundlagen in angemessenem Rahmen betrachten zu können. In der Praxis ist diese Betrachtung nicht ganz korrekt, da die Ungenauigkeiten veränderlich sind (z.B. durch Temperaturschwankungen), jedoch liegt der hierdurch bedingte Fehler in der Praxis auf einem vernachlässigbaren Niveau. Die Schätzung der Laufzeit unter Berücksichtigung von konstanten Quarz-Ungenauigkeiten ergibt sich damit zu

$$\tilde{t}_{p,TWR} = \frac{t_{round,A}(1 + \delta_A) - t_{reply,B}(1 + \delta_B)}{2}. \quad (2.4)$$

Damit berechnet sich der Fehler der Laufzeitmessung in Abhängigkeit der Quarz-Ungenauigkeiten zu

$$\begin{aligned} \Delta t_{p,TWR} &= \tilde{t}_{p,TWR} - t_{p,TWR} \\ &= \frac{t_{round,A}(1 + \delta_A) - t_{reply,B}(1 + \delta_B) - [t_{round,A} - t_{reply,B}]}{2} \\ &= \frac{t_{round,A} \cdot \delta_A - t_{reply,B} \cdot \delta_B}{2} \\ &= \frac{(2 \cdot t_p + t_{reply,B})\delta_A - t_{reply,B}\delta_B}{2} \\ &= \frac{2t_p\delta_A + t_{reply,B}\delta_A - t_{reply,B}\delta_B}{2} \\ &= t_p\delta_A + \frac{1}{2}t_{reply,B}(\delta_A - \delta_B). \end{aligned} \quad (2.5)$$

Der Fehler in der Laufzeitmessung stellt bei diesem Verfahren also eine Funktion dar, die abhängig ist von

- den Quarz-Ungenauigkeiten δ_A und δ_B ,
- der Laufzeit t_p und

- der Antwortzeit $t_{reply,B}$.

Die Quarz-Ungenauigkeiten liegen üblicherweise zwischen 20 ppm bis 40 ppm. Es gibt auch höherwertige Quarze, die jedoch um ein Vielfaches mehr kosten. Das Ziel ist es daher, ein Verfahren zu finden, welches auch mit Standard-Quarzqualitäten gute Ergebnisse erzielt.

Die Laufzeit ist direkt abhängig von der Entfernung der beiden Module. Als gut zu merkender Wert beträgt die Laufzeit bei einer Entfernung von 30 m ca. 0,1 μ s.

Die Antwortzeit ist die Zeit, die das empfangende Modul benötigt, um eine Antwort zu senden. Diese Antwortzeit muss am Sender bekannt sein, um die Laufzeit berechnen zu können. Sie ist daher fester Bestandteil der Systemkonfiguration. Gleichung 2.5 zeigt, dass der Fehler proportional zur Antwortzeit ist; eine möglichst kurze Antwortzeit ist daher wünschenswert. Allerdings ist eine kurze Antwortzeit durch nötige Berechnungen auf Empfängerseite nicht immer zu erreichen.

Abbildung 2.6 zeigt die Abhängigkeit des Fehlers der Messung in Abhängigkeit der Quarz-Ungenauigkeit. Die Antwortzeit ist hierbei zu 1 ms angenommen. Selbst bei geringen Quarz-Ungenauigkeiten wächst der Fehler schnell an, sodass das unsynchronisierte TWR-Verfahren für praktische Anwendungen ausscheidet.

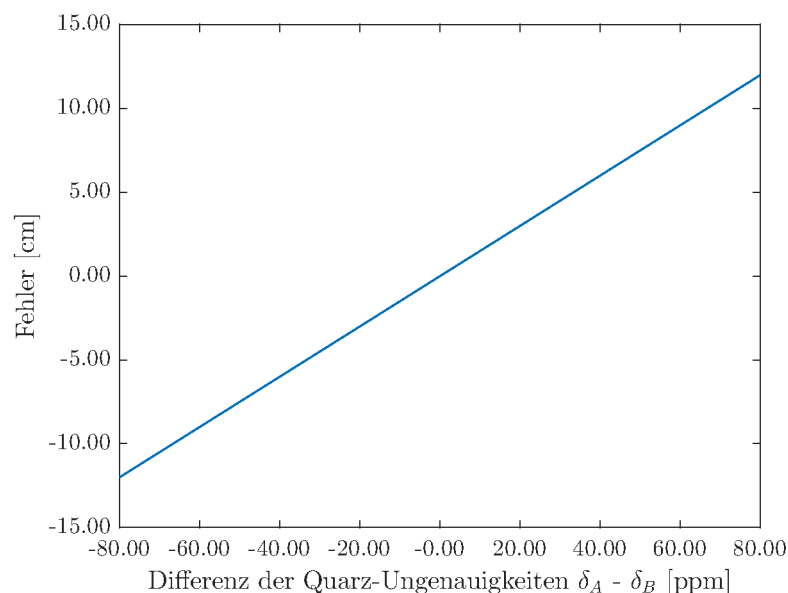


Abbildung 2.6: Fehler in der Entfernungsmessung beim TWR-Verfahren über die Quarz-Ungenauigkeit. Die Entfernung wurde zu 30 m und die Antwortzeit zu 1 ms angenommen.



2.1.3.2 Synchronous-Double-Sided Two-Way-Ranging

Das TWR-Verfahren nutzt lediglich zwei Messungen, um die Entfernung zwischen zwei Modulen zu bestimmen. Jenes Verfahren benötigt jedoch eine Synchronisation der beteiligten Module um eine akzeptable Genauigkeit zu erreichen. Um diese Notwendigkeit zu eliminieren, wird das Synchronous-Double-Sided Two-Way-Ranging (SDS-TWR)-Verfahren eingesetzt [8]. Dieses Verfahren (Abbildung 2.7) nutzt vier (bzw. drei) Übertragungen um eine Entfernungsmessung durchzuführen.

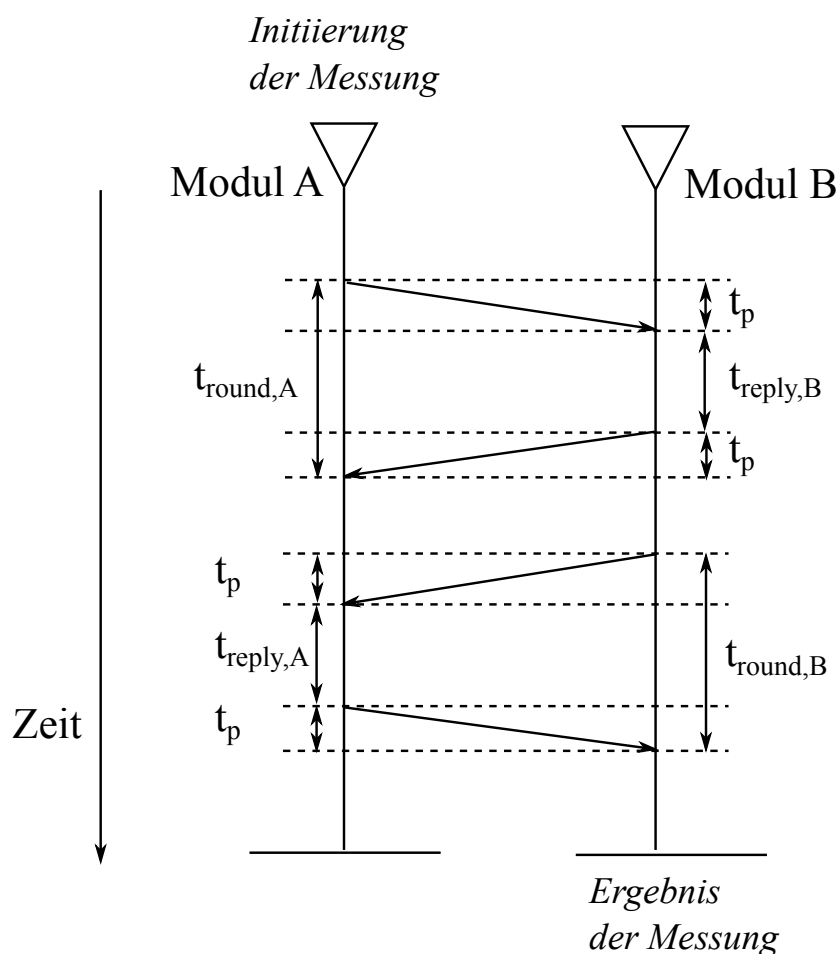


Abbildung 2.7: Synchronous-Double-Sided Two-Way-Ranging-Verfahren. Die zweite und dritte Übertragung werden in der Praxis zusammengefasst, sodass nur drei physikalische Übertragungen stattfinden.

Bei diesem Verfahren werden vier Laufzeitmessungen durchgeführt. Der Vorteil dieser Variante besteht darin, dass die Entfernungsmessung von zwei Seiten durchgeführt wird und so die Quarzungengenauigkeiten größtenteils kompensiert werden

können. In der Praxis werden die zweite und die dritte Übertragung zusammengefasst. Dadurch werden tatsächlich nur drei Übertragungen getätigt. Die folgenden Betrachtungen gelten auch für diesen Fall. Die Übertragungszeiten für jeweils eine Messung von beiden Modulen aus gesehen betragen

$$t_{round,A} = 2 \cdot t_p + t_{reply,B} \quad (2.6)$$

$$t_{round,B} = 2 \cdot t_p + t_{reply,A} \quad (2.7)$$

Durch Kombination der Gleichungen 2.6 und 2.7 ergibt sich für die Laufzeit t_p bei dem SDS-TWR-Verfahren:

$$t_{round,A} + t_{round,B} = 4 \cdot t_p + t_{reply,A} + t_{reply,B} \quad (2.8)$$

$$\Rightarrow t_{p,SDSTWR} = \frac{1}{4}(t_{round,A} + t_{round,B} - t_{reply,A} - t_{reply,B}). \quad (2.9)$$

Unter Berücksichtigung der Quarzungengenauigkeiten (wie in 2.1.3.1) erhält man die Schätzung der Laufzeit

$$\tilde{t}_{p,SDSTWR} = \frac{(t_{round,A} - t_{reply,A})(1 + \delta_A) + (t_{round,B} - t_{reply,B})(1 + \delta_B)}{4}. \quad (2.10)$$

Der Fehler der Laufzeitmessung ergibt sich damit zu

$$\Delta t_{p,SDSTWR} = \frac{(t_{round,A} - t_{reply,A})\delta_A + (t_{round,B} - t_{reply,B})\delta_B}{4} \quad (2.11)$$

$$= \frac{(2 \cdot t_p + t_{reply,B} - t_{reply,A})\delta_A + (2 \cdot t_p + t_{reply,A} - t_{reply,B})\delta_B}{4} \quad (2.12)$$

$$= \frac{2 \cdot t_p(\delta_A + \delta_B) + t_{reply,B}(\delta_A - \delta_B) + t_{reply,A}(\delta_B - \delta_A)}{4} \quad (2.13)$$

$$= \frac{t_p(\delta_A + \delta_B)}{2} + \frac{t_{reply,B}(\delta_A - \delta_B) + t_{reply,A}(\delta_B - \delta_A)}{4}. \quad (2.14)$$

Wenn die Antwortzeit auf beiden Seiten gleich gewählt wird, also

$$t_{reply,A} = t_{reply,B} = t_{reply} \quad , \quad (2.15)$$

dann folgt

$$\Delta t_{p,SDSTWR} = \frac{t_p(\delta_A + \delta_B)}{2} + \frac{t_{reply}(\delta_A - \delta_B) + t_{reply}(\delta_B - \delta_A)}{4} \quad (2.16)$$



$$= \frac{t_p(\delta_A + \delta_B)}{2}. \quad (2.17)$$

Der Fehler in der Laufzeitmessung bei diesem Verfahren ist damit abhängig von

- den Quarzungenauigkeiten und
- der Laufzeit.

Abbildung 2.8 zeigt die Abhängigkeit des Fehlers in der Entfernungsmessung von der Differenz der Quarzungenauigkeiten. Ein entscheidender Vorteil bei diesem Verfahren im Gegensatz zu dem TWR-Verfahren ist die Unabhängigkeit von der Antwortzeit t_{reply} . Dadurch wird der Fehler der Messung drastisch verringert: Im Vergleich zum einfachen TWR-Verfahren hat sich der Fehler ca. um den Faktor 100 verbessert. Jedoch ist ein Nachteil bei diesem Verfahren, dass das Ergebnis der Messung nicht auf der initiierenden Seite vorliegt. Hierfür muss eine weitere Übertragung des Ergebnisses erfolgen.

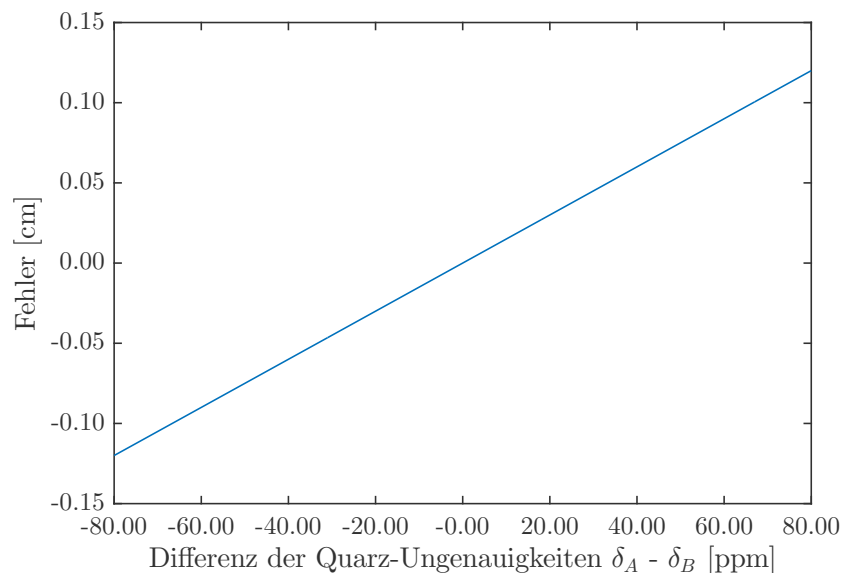


Abbildung 2.8: Fehler in der Entfernungsmessung beim SDSTWR-Verfahren über die Quarzungenauigkeit. Die Entfernung wurde zu 30 m angenommen, die Antwortzeit ist bei diesem Verfahren zu vernachlässigen (unter der Annahme, dass sie für beide Module gleich ist).

2.2 Multilateration

Basierend auf der Kombination von mehreren Entfernungsmessungen kann eine Positionsbestimmung im Mehrdimensionalen erreicht werden. Dieses Verfahren wird als

Multilateration bezeichnet. In Abbildung 2.9 ist das grundlegende Prinzip des Verfahrens im Zweidimensionalen veranschaulicht. Es existieren drei Anker, welche ortsfest sind. Der Tag soll nun relativ zu diesen positioniert werden. Dazu werden nacheinander die Entfernungen zwischen jedem Anker und dem Tag gemessen. Hierbei wird vorausgesetzt, dass der Tag während dieser Messungen still steht. Eine Verletzung dieser Annahme führt zu einer Verschlechterung der Positioniergenauigkeit. In der Praxis ist diese Annahme nur bedingt zulässig jedoch kann der Effekt minimiert werden, indem die Dauer der Messungen im Vergleich zur Bewegungsgeschwindigkeit des Tags vernachlässigbar klein gewählt wird. Ist nur die Entfernung zwischen einem der Anker und dem Tag bekannt, so liegt der Standort des Empfängers auf einem Kreis um den Anker herum. Bei zwei bekannten Entfernungen ist die Position einer der beiden Schnittpunkte der beiden Kreise. Um die Position des Empfängers im zweidimensionalen Raum eindeutig bestimmen zu können, muss die Anzahl der Anker $N \geq 3$ sein.

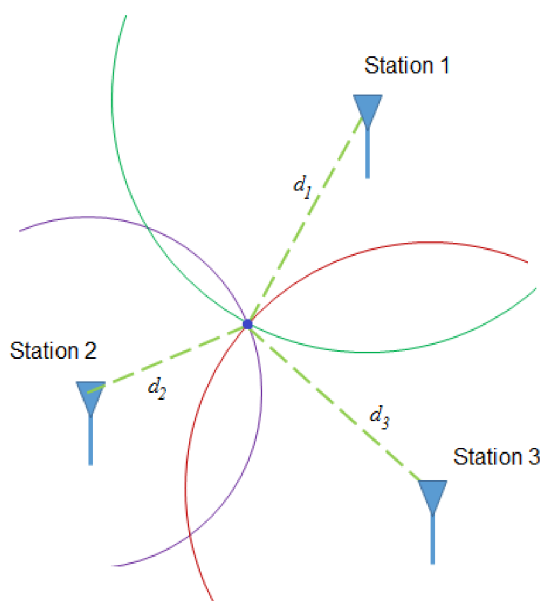


Abbildung 2.9: Prinzip der Multilateration.

Für die mathematische Herleitung des Verfahrens wird der Fall auf die dritte Dimension verallgemeinert. In diesem Fall werden im Allgemeinen vier Anker benötigt. Wenn nur eine Entfernung bekannt ist, liegt die Position des Tags auf einer Kugeloberfläche um den Anker. Dies gilt ebenfalls für die drei anderen Anker. Für jede Kugel gilt die Kugelgleichung

$$r_i^2 = (x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2 \quad , \quad (2.18)$$



wobei (x_i, y_i, z_i) die bekannten Koordinaten des i -ten Ankers im dreidimensionalen Raum und (x, y, z) die unbekanntenen Koordinaten des Tags sind. Löst man das Gleichungssystem mit N Anker

$$\begin{cases} r_1^2 = (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2 \\ \dots \\ r_N^2 = (x_N - x)^2 + (y_N - y)^2 + (z_N - z)^2 \end{cases} \quad (2.19)$$

so erhält man die Koordinaten des Tags im dreidimensionalen Raum. Im Gegensatz zu linearen Gleichungssystemen, bei denen nur genau eine Lösung, keine Lösung oder ein ganzer affiner Unterraum als Lösung auftreten kann, sind bei nichtlinearen Gleichungen auch mehrere oder unendlich viele isolierte Lösungen möglich [9]. Ein nichtlineares Gleichungssystem kann numerisch gelöst werden, indem die gesuchten Parameter so gewählt werden, dass die Funktionswerte $F(x_i)$ mit den gemessenen Entfernungen r_i möglichst genau übereinstimmen. Man versucht mithilfe des Gauß-Newton-Verfahrens das Residuum mit der Methode der kleinsten Quadrate zu minimieren, also:

$$\|F(x) - r\|^2 \longrightarrow \min, r = \begin{pmatrix} r_1 + \Delta_{r,1} \\ \vdots \\ r_N + \Delta_{r,N} \end{pmatrix}. \quad (2.20)$$

2.3 Dilution of Precision (DOP)

Der Begriff Dilution of Precision (DOP) bezeichnet einen Faktor, welcher angibt, wie sehr sich die Präzision eines Lokalisierungssystems durch die geometrische Beschaffenheit des Systems verschlechtert. Im folgenden Abschnitt werden die Grundlagen, die zur Berechnung dieses Einflusses notwendig sind, erläutert.

2.3.1 Einfluss von Fehlern in der Entfernungsmessung

Das Gleichungssystem 2.19 ist nur gültig für den idealen Fall. In einem realen System sind die Entfernungsmessungen ungenau und mit einem Fehler behaftet. In diesem Fall ist die Lösung des Gleichungssystems nicht mehr eindeutig, sondern besteht aus einem Lösungsraum, aus welchem die beste Lösung gewählt werden muss. Im Dreidimensionalen ergibt sich dadurch ein Fehlerraum. Dieser wird üblicherweise als Ortungs- bzw. Positionsfehleraum bezeichnet (siehe Abbildung 2.10). [10]

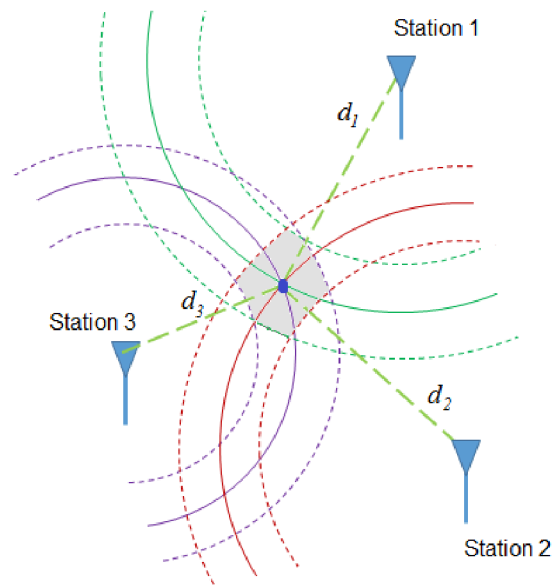


Abbildung 2.10: Prinzip der nicht-idealen Multilateration (Darstellung für den 2D-Fall).

Um festzustellen, wie sich die Fehler bei der Entfernungsmessung auf den Fehler der Positionsbestimmung auswirken, wird die Beziehung zwischen der Position des Empfängers und den Entfernungen zu den Referenzstationen untersucht. Diese Beziehung kann in Form einer Funktion dargestellt werden:

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}(\mathbf{r}), \quad (2.21)$$

wobei \mathbf{x} die Position des Tags im dreidimensionalen Raum und \mathbf{r} die Entfernungen zu den Referenzstationen bezeichnen. Die Entfernung r_i zur i -ten Referenzstation wird berechnet als

$$r_i = \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|, \quad \mathbf{x}_i \in \mathbb{R}^3, i \in \{1, 2, \dots, N\}, \quad (2.22)$$

wobei \mathbf{x}_i die Koordinaten der i -ten Referenzstation darstellen. Dann kann der Vektor $\mathbf{r} \in N \times 1$ definiert werden als

$$\mathbf{r} = \begin{pmatrix} r_1 \\ \vdots \\ r_N \end{pmatrix}. \quad (2.23)$$

Die Abhängigkeit der Koordinaten des mobilen Objekts von der gemessenen Entfernung zur Referenzstationen $\mathbf{x} = \mathbf{x}(\mathbf{r})$ ist nicht bekannt. Hingegen ist durch Gleichung 2.22 die Abhängigkeit der Entfernung zwischen i -ten Anker und dem Tag und den Koordinaten des Tags, also die Umkehrfunktion $\mathbf{r} = \mathbf{r}(\mathbf{x})$, gegeben. Basierend auf



der Funktion $\mathbf{r} = \mathbf{r}(\mathbf{x})$ kann der Fehler der Positionsbestimmung ermittelt werden. Der Einfluss einer fehlerbehafteten Position des Tags \mathbf{x} auf die Entfernungen \mathbf{r} kann mithilfe der Taylorreihe abgeschätzt werden:

$$\mathbf{r}(\mathbf{x} + \Delta\mathbf{x}) = \mathbf{r}(\mathbf{x}) + \mathbf{r}'(\mathbf{x}) \cdot \Delta\mathbf{x} + \frac{1}{2!} \mathbf{r}''(\mathbf{x}) \cdot (\Delta\mathbf{x})^2 + \dots + \frac{1}{n!} \mathbf{r}^{(n)}(\mathbf{x}) \cdot (\Delta\mathbf{x})^n. \quad (2.24)$$

Wenn $\Delta\mathbf{x}$ genügend klein ist, sind Glieder höherer Ordnung vernachlässigbar. Man erhält für $\Delta\mathbf{r}$ die Näherungslösung:

$$\Delta\mathbf{r} = \mathbf{r}(\mathbf{x} + \Delta\mathbf{x}) - \mathbf{r}(\mathbf{x}) \approx \mathbf{r}'(\mathbf{x}) \cdot \Delta\mathbf{x}. \quad (2.25)$$

$\mathbf{r}'(\mathbf{x})$ ist die Jacobi-Matrix der ersten partiellen Ableitungen:

$$\mathbf{r}'(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} r'_1(\mathbf{x}) \\ \vdots \\ r'_N(\mathbf{x}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial r_1}{\partial x_1} & \frac{\partial r_1}{\partial x_2} & \frac{\partial r_1}{\partial x_3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial r_N}{\partial x_1} & \frac{\partial r_N}{\partial x_2} & \frac{\partial r_N}{\partial x_3} \end{pmatrix}, \quad (2.26)$$

mit

$$r_i = \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|_2 = \sqrt{(x_1 - x_{i1})^2 + (x_2 - x_{i2})^2 + (x_3 - x_{i3})^2} \quad (2.27)$$

erhalten wir für Gleichung 2.26

$$\mathbf{A} = \mathbf{r}'(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} \frac{\mathbf{x} - \mathbf{x}_1}{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_1\|_2} \\ \vdots \\ \frac{\mathbf{x} - \mathbf{x}_N}{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_N\|_2} \end{pmatrix}. \quad (2.28)$$

Damit kann $\Delta\mathbf{r}$ dargestellt werden als

$$\Delta\mathbf{r} = \mathbf{A}\Delta\mathbf{x}. \quad (2.29)$$

Die Position des Tags \mathbf{x} sei als fest angenommen. Der Zusammenhang zwischen dem Fehler der Entfernungsmessung und der bekannten Position des Tags ist nicht linear. Wenn $\Delta\mathbf{x}$ genügend klein ist, kann er durch die Linearisierung approximiert werden. Daher lässt sich die Schätzung für $\Delta\mathbf{x}$ mithilfe der Regressionsanalyse herleiten. Das Gleichungssystem 2.29 kann mittels der Methode der kleinsten Quadrate gelöst werden, indem man $\Delta\mathbf{x}$ so bestimmt, dass die Abweichung $\mathbf{A}\Delta\mathbf{x} - \Delta\mathbf{r}$ minimal wird:

$$\|\mathbf{A}\Delta\mathbf{x} - \Delta\mathbf{r}\|_2 \longrightarrow \min. \quad (2.30)$$

Daraus ergibt sich ein Normalgleichungssystem

$$\mathbf{A}^T \mathbf{A} \Delta \mathbf{x} = \mathbf{A}^T \Delta \mathbf{r} \quad , \quad (2.31)$$

das die Lösung des Minimierungsproblems liefert. Daraus folgt

$$\Delta \mathbf{x} = \underbrace{(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T}_{\mathbf{A}^+} \Delta \mathbf{r} \quad , \quad (2.32)$$

wobei \mathbf{A}^+ die Pseudoinverse ist.

Mit Gleichung 2.32 lässt sich die Differenz zwischen der tatsächlichen und der berechneten Objektposition berechnen. Um die Genauigkeit der Koordinatenbestimmung zu berechnen, betrachten wir den Vektor $\Delta \mathbf{x}$ als einen Zufallsvektor, da dessen Komponenten durch eine Messung bestimmt wurden.

Informationen über die Streuung eines Zufallsvektors und über Korrelationen zwischen dessen Komponenten enthält die Kovarianzmatrix. Betrachten wir einen beliebigen Zufallsvektor $\mathbf{X} = (X_1, \dots, X_n)^T$, dann ist die zugehörige Kovarianzmatrix $Cov(\mathbf{X})$ gegeben durch:

$$Cov(\mathbf{X}) = (Cov(X_i, X_j))_{i,j=1,\dots,n} = \begin{pmatrix} Cov(X_1, X_1) & \cdots & Cov(X_1, X_n) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Cov(X_n, X_1) & \cdots & Cov(X_n, X_n) \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{n,n} \quad . \quad (2.33)$$

Da X und Y zwei reelle, integrierbare Zufallsvariablen sind, deren Erwartungswerte $E(X)$, $E(Y)$ und $E(XY)$ existieren, existiert die Kovarianz von X und Y :

$$Cov(X, Y) := E[(X - E(X)) \cdot (Y - E(Y))] \quad . \quad (2.34)$$

Die Kovarianz eines Elements des Zufallsvektors mit sich selbst, also $Cov(X, X)$, ergibt die Varianz:

$$\begin{aligned} Cov(X, X) &= E[(X - E(X)) \cdot (X - E(X))] \\ &= E[(X - E(X))^2] \\ &= Var(X) \end{aligned} \quad . \quad (2.35)$$

Aus Gleichung 2.35 folgt, dass sich die Varianzen der Komponenten des Zufallsvektors auf der Hauptdiagonalen der Kovarianzmatrix befinden. Angenommen, die Entfernung zu jeder Referenzstation wird mit der gleichen Genauigkeit σ_r gemessen. Da die Einzelmessungen nicht korreliert sind, ergibt sich die Kovarianzmatrix



für $\Delta \mathbf{r}$:

$$\text{Cov}(\Delta \mathbf{r}) = \sigma_r^2 \mathbf{I} \quad , \quad (2.36)$$

wobei \mathbf{I} die Einheitsmatrix ist. Mit Gleichung 2.32 erhalten wir für die Kovarianzmatrix des Vektors $\Delta \mathbf{x}$:

$$\begin{aligned} \text{Cov}(\Delta \mathbf{x}) &= \text{Cov}(\mathbf{A}^+ \Delta \mathbf{r}) \\ &= \mathbf{A}^+ \text{Cov}(\Delta \mathbf{r}) (\mathbf{A}^+)^T \\ &= \mathbf{A}^+ \sigma_r^2 \mathbf{I} (\mathbf{A}^+)^T \\ &= \sigma_r^2 (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{A} ((\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1})^T \\ &= \sigma_r^2 (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \quad . \end{aligned} \quad (2.37)$$

Nach dem Satz von Gauß-Markow liefert Gleichung 2.32 den linearen erwartungstreuen Schätzer minimaler Varianz. Sei $\mathbf{Q} := (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}$, dann kann die Varianz der Position des Empfängers berechnet werden durch

$$\begin{aligned} \sigma_x^2 &= \sigma_r^2 Q_{11} \quad , \\ \sigma_y^2 &= \sigma_r^2 Q_{22} \quad \text{und} \\ \sigma_z^2 &= \sigma_r^2 Q_{33} \quad . \end{aligned} \quad (2.38)$$

2.3.2 Einfluss der geometrischen Konfiguration des Messsystems

Der Einfluss des geometrischen Konfiguration eines Messsystems ist in Abbildung 2.11 dargestellt. Im Gegensatz zu Abbildung 2.10 hat sich die Position der Station 2 maßgeblich verändert. Dadurch erweitert sich der Unsicherheitsbereich des Positionierungsergebnisses in der Achse, auf der die Stationen 1 und 2 liegen. Je nachdem wie ungünstig die Anker positioniert werden, kann sich dieser Einfluss erheblich auf die Genauigkeit des Ergebnisses auswirken.

Zur Spezifikation des DOP-Faktors betrachtet man folgende Werte (nach [11], [12]):

- PDOP (engl.: Position Dilution of Precision): Verringerung der Positionsgenauigkeit. Gibt den Ungenauigkeitsfaktor der benutzerbezogenen dreidimensionalen Positionsbestimmung an.
- HDOP (engl.: Horizontal Dilution of Precision): Horizontale Abschwächung der Genauigkeit. Gibt den Ungenauigkeitsfaktor der Positionsbestimmung in der horizontalen Ebene an.

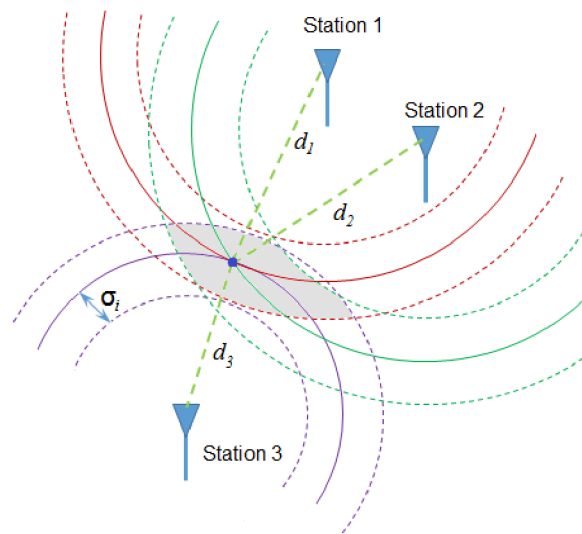


Abbildung 2.11: Verschlechterung der Präzision durch den Einfluss der geometrischen Beschaffenheit eines Positioniersystems (DOP).

- VDOP (engl.: Vertical Dilution of Precision): Vertikale Verringerung der Genauigkeit. Gibt den Ungenauigkeitsfaktor der Positionsbestimmung für die Höhe an.

Die folgende Tabelle gibt Wertebereiche für den DOP an, wie sie üblicherweise verwendet werden:

DOP	Note	Leistungsbeschreibung
1	Sehr gut	Genügt höchsten Ansprüchen
2 – 3	Gut	Für alle Genauigkeitsforderungen hinreichend
4 – 6	Befriedigend	Gut für Allgemeine Anforderungen
7 – 8	Ausreichend	Wert ist eingeschränkt akzeptabel für viele Anwendungen
9 – 20	Mangelhaft	Wert nur als Grobschätzung tauglich
> 20	Ungenügend	Messungen sollten nicht benutzt werden

Tabelle 2.1: Einordnung der DOP-Werte. [11]

Basierend auf den Herleitungen aus dem Abschnitt 2.3.1 können die DOP-Faktoren



wie folgt berechnet werden:

$$\begin{aligned} PDOP &= \frac{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2}}{\sigma_r} = \sqrt{Q_{11} + Q_{22} + Q_{33}} \\ HDOP &= \frac{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}}{\sigma_r} = \sqrt{Q_{11} + Q_{22}} \\ VDOP &= \frac{\sqrt{\sigma_z^2}}{\sigma_r} = \sqrt{Q_{33}} \quad . \end{aligned} \tag{2.39}$$

3 Stand der Technik und Forschung

Im Folgenden wird der Stand der Technik der Positionsbestimmung im Schwermaschinenbau unter besonderer Berücksichtigung des Bergbaus zusammengefasst. Eine Gruppe von Systemen wird an dieser Stelle der Vollständigkeit halber genannt, aber nicht weiter betrachtet: stationäre Systeme, wie z.B. Laser-Geodimeter (umgangssprachlich auch Tachymeter genannt). Diese Geräte ermöglichen die Ortung mit hoher Genauigkeit (im Millimeter-Bereich) und bei großen Entfernungen (bis zu mehreren Kilometern). Diese Systeme verwenden hochgenaue Lasermesstechnik und sehr genaue Encoder, um Entfernungen und Winkelstellungen zu messen. Die Dynamik dieser Systeme ist jedoch vergleichsweise niedrig. Messungen benötigen üblicherweise mehrere Sekunden; Messungen sich schnell bewogender Objekte scheiden damit für diese Systeme aus. Zudem müssen die Systeme auf festem Untergrund stehen und exakt ausgerichtet werden. Der Einsatz auf mobilem Gerät ist daher unmöglich. Diese Geräte werden im Folgenden nicht weiter betrachtet.

Der Einsatz von Positioniersystemen hat meist sicherheitsbezogene Gründe. Als Beispiel sei hier eine mobile Gewinnungsmaschine (konkret eine Teilschnittmaschine) genannt. Das Erkennen und Positionieren/Lokalisieren von Arbeitern im (näheren) Umfeld der Maschine ist von vorrangigem Interesse, um ein versehentliches Verfahren der Maschine zu verhindern, bei dem ein Arbeiter zu Schaden kommen könnte. Die Verwendung von diesen Kollisionsschutzsystemen (engl. Collision Avoidance System (CAS)) ist beim Einsatz von bestimmten mobilen Maschinen in vielen Ländern bereits gesetzlich vorgeschrieben. Die Mine Safety and Health Administration (MSHA) hat in 2015 eine Regelung erlassen, wonach alle Continuous-Miner, die in den USA betrieben werden, mit Kollisionsschutzsystemen ausgerüstet werden müssen, um Zusammenstöße und damit Unfälle mit Personen zu verhindern. [13]



3.1 Technologische Unterscheidung von Positioniersystemen

Bei der Bewertung eines Positioniersystems müssen verschiedene Faktoren berücksichtigt werden. Diese Faktoren können auch genutzt werden, um Systeme zu kategorisieren. Im Rahmen dieser Betrachtungen sollen die folgenden Kriterien zur Unterscheidung dienen:

- Messprinzip: ToA, TDoA, RSS, . . . ,
- genutzte Frequenz(-bandbreite) und
- Systemarchitektur: Tag-basiert oder Nicht-Tag-basiert.

Das Messprinzip kann (wie im Folgenden gezeigt wird) schon eine Aussage über die erreichbare Genauigkeit geben. Weiterhin gibt das Messprinzip einen Anhaltspunkt darüber, wie robust das System gegenüber gewissen Störeinflüssen sein kann. Ebenso wichtig für die erreichbare Genauigkeit ist die genutzte Frequenz(-bandbreite). Je höher die Frequenz ist, desto genauer kann das System prinzipiell arbeiten. Jedoch erhöht sich dadurch auch die Anfälligkeit gegenüber Störeinflüssen wie z.B. Nebel und Staub. Ein anschauliches Beispiel ist der Vergleich zwischen Radarsystemen und optischen Kameras. Zwar bieten optische Kameras eine höhere Auflösung (genutzter Frequenzbereich liegt bei 384 THz bis 789 THz), jedoch können diese bei Regen oder hohem Staubaufkommen nichts mehr sehen. Ein Radarscanner, welcher im Bereich von 24 GHz bzw. 77 GHz arbeitet, kann zwar nicht die Auflösungsgenauigkeit der optischen Kameras erreichen, ist aber auch bei Regen und hohem Staubaufkommen weiterhin einsetzbar. Erfahrungen in verschiedenen Messkampagnen am Institut für Maschinentechnik der Rohstoffindustrie zeigten mehrfach die Unterlegenheit von Laser-basierten Messsystemen in Umgebungen, in denen eine hohe Staub- bzw. Nebelbelastung auftritt. Dort ist der Einsatz solcher Systeme nicht empfehlenswert (siehe auch Abschnitt 6.2). Eine detaillierte Messreihe über den Einfluss von widrigen Witterungsbedingungen auf Lasermesstechnik im Vergleich zur Radartechnik ist in [14] zu finden.

Zuletzt ist die Systemarchitektur entscheidend dafür, ob ein System für eine gewisse Anwendung einsetzbar ist oder nicht. Ein Tag-basiertes System ist nur schwer in Anwendungen einsetzbar, in denen das zu positionierende Objekt dauernd wechselt bzw. durch Abnutzung immer wieder erneuert werden muss. Dafür können Tag-basierte Systeme prinzipiell eine höhere Genauigkeit erreichen.

Technologie	typ. Genauigkeit	Produktbeispiele
optische Kamerasysteme	<1 mm bis 1 cm	Hagisonic StarGazer [16]
elektronische Tachymeter, Lasermesssysteme	1 mm bis 1 cm	Trimble S7 Totalstation [17], Leica Nova TM50 [18]
Infrarot-Kamerasysteme	1 cm	Ambiplex RTLS [19]
Ultraschall (ToA/ TDoA)	1 cm bis 3 cm	Cricket [20]
2 GHz bis 4 GHz-Radar (ToA/ TDoA)	1 m	Nanotron RTLS [21]
Wlan (RSS), Bluetooth (RSS)	1 m bis 5 m	Ekahau RTLS [22], indoors Hybrid Localization [23], inf- soft Indoor Navigation [24]

Tabelle 3.1: Auszug verfügbarer Produkte für die allgemeine Indoor-Positionsbestimmung.

3.2 Produkte am Markt

In diesem Abschnitt werden einige Produkte vorgestellt, welche am Markt verfügbar sind und zur Ortung eingesetzt werden. Im Bereich der allgemeinen Indoor-Positionsbestimmung existiert eine Vielzahl an verschiedenen Produkten. Diese Produkte unterscheiden sich hauptsächlich in Bezug auf die eingesetzten Technologien. Die meisten Produkte verwenden etablierte Funkstandards wie WLAN oder Bluetooth, da die Infrastruktur hierfür meist schon vorhanden ist. Andere Produkte nutzen (Infrarot-)Kameras und aufgeklebte Landmarken, welche dann im Kamerabild geortet werden. (Ultra-)Schallbasierte Systeme finden sich ebenfalls, wobei diese Systeme eher selten sind. Ein Auszug dieser Produkte ist in Tabelle 3.1 aufgeführt. Darüber hinaus gibt [15] einen ausführlichen Überblick über Forschungsbemühungen und Produktentwicklungen in diesem Bereich.

Da diese allgemeinen Systeme jedoch nicht an die Anforderungen der Schwerindustrie angepasst sind, werden diese im Folgenden nicht weiter betrachtet. Es werden die Produkte und Lösungen im Detail vorgestellt, welche für die Schwerindustrie entwickelt wurden. Die vorgestellten Produkte sind nicht gruppiert. Stattdessen wird in den jeweiligen Abschnitten auf die oben genannten Unterscheidungskriterien eingegangen.



3.2.1 UCAS-430 (Becker Mining Systems)

Die Firma Becker Mining Systems vertreibt unter dem Namen UCAS eine Reihe von Kollisionsschutzsystemen speziell für den untertägigen Bergbau. Auf dem zu schützenden Betriebsmittel werden mehrere Anker angebracht, welche im Zusammenspiel die Tags in der Umgebung identifizieren und positionieren können. Hierzu werden mehrere Technologien parallel verwendet: Funktechnologie im Super-High Frequency (SHF)-Band bei 2.4 GHz und im Ultra-High Frequency (UHF)-Band (300 MHz bis 3000 MHz), sowie magnetische Wechselfelder im unteren KHz-Bereich. Genauere Informationen über die verwendeten Frequenzen sind derzeit nicht bekannt. Die Funktechnologien verwenden ToF-Messungen, um eine Entfernung zwischen Anker und Tag zu bestimmen; über eine Auswertung der magnetischen Wechselfelder wird via RSS-Messungen auf eine 3D-Position relativ zur Ankerantenne geschlossen. Eine zentrale Auswerteeinheit auf der Maschine wertet alle Signale, die von den umgebenden Tags gesendet werden, aus und berechnet daraus die Position der einzelnen Tags. Je nach Position eines (oder mehreren) Tags wird eine Warnung ausgegeben oder ein Alarm ausgelöst. Das System ist ebenfalls in der Lage, den Not-Aus der Maschine auszulösen, sollte ein Tag im Gefahrenbereich erkannt werden. [25] [26]

3.2.2 LPR(r) (Symeo)

Die Firma Symeo vertreibt unter dem Markennamen LPR Positionierlösungen für den industriellen Einsatz. Die Systeme verwenden unter anderem das 5,8 GHz Industrial, Scientific and Medical (ISM)-Band, können aber auch mit anderen (nicht herstellereigenen) Technologien kombiniert werden (z.B. GPS). Die Infrastruktur des Systems erfordert mehrere Anker, welche an festen Positionen angebracht sind. Basierend auf ToF-Messungen zu diesen Ankern ermittelt das System die Position von den relevanten Tags. Symeo gibt eine maximale Reichweite zwischen Transponder und Tag von 400 m an. Die Ortung wird in 2D durchgeführt. Mit einer ausreichenden Anzahl an Transpondern kann in diesem 2D-Fall eine Genauigkeit von 5 cm bis 20 cm erreicht werden. [27]

3.2.3 indurad Positionslösungen

Die Firma indurad vertreibt verschiedene auf Radartechnik basierende Lösungen zur Ortung von mobilen Betriebsmitteln. Das Unternehmen hat sich klar auf Anwendungen im Bergbau spezialisiert und bietet auf verschiedene Anwendungsfälle

zugeschnittene Lösungen an. Zu den Positionsbestimmungslösungen zählt iPosition. Das System verwendet 2D-Radarsensoren und Reflektoren, um eine Ortung des mobilen Geräts (z.B. an einer Bandübergabe) zu ermöglichen. Damit arbeiten die meisten Sensoren ohne Tags und sind auf entsprechende Reflektoren bzw. eindeutig reflektierende Objekte im Sichtbereich angewiesen. Die meisten eingesetzten Radarsensoren arbeiten bei 24 GHz oder 77 GHz. Die Lösung iTruck bietet ein Kollisionsschutz-System für mobile Maschinen. Das System basiert auf GPS, Inertialsensorik und Doppler-Radaren, um eine Position des mobilen Geräts zu ermitteln. Zusätzlich kommen mehrere 2D-Radarsensoren zum Einsatz, um einen umfassenden Kollisionsschutz zu realisieren. [28] [29]

3.2.4 MineStar™ (Caterpillar)

Unter dem Namen MineStar vertreibt das Unternehmen Caterpillar eine Reihe von Automatisierungslösungen für den Bergbau. Neben Flottenmanagement und Prozessüberwachungsfunktionen erlaubt die Detect-Produktfamilie die Ortung von mobilem Gerät. Je nach Einsatzort kommen verschiedene Technologien zum Einsatz: Zur Ortung von SKWs im übertägigen Bergbau GPS, Radar und visuelle Kameras; im untertägigen Einsatz bietet das System die Ortung von Bergleuten im Strebbau über die Radio-Frequency-Identification (RFID)-Technologie an. Genaue Frequenzen des RFID-Systems sind nicht bekannt. Um die Positionsbestimmung im Streb zu ermöglichen, tragen die Arbeiter Tags und an den Schildausbau werden in regelmäßigen Abständen Anker angebracht. Alle Anker sind dann mit einer gemeinsamen Kontrolleinheit verbunden. Über Feldstärkemessungen werden die Positionen der einzelnen Tags berechnet. [30] [31]

3.2.5 LaseBTL (Lase)

Die Firma Lase GmbH vertreibt verschiedene Lösungen zur Positionsbestimmung, Volumenmessung und Kollisionsvermeidung basierend auf Lasermesstechnik. Die Lösungen basieren auf der Sensorpalette des Unternehmens, welche von 1D bis 3D Laserscannern reicht, wobei die 3D-Scanner aus einem 2D-Scanner und einer Schwenkeinheit bestehen. Informationen über die verwendeten Sensoren und deren Genauigkeiten sind nicht von der Firma Lase veröffentlicht. Die angebotenen Produkte weisen jedoch stark auf angepasste Sensoren der Firma SICK hin. Diese arbeiten im Nah-Infrarot-Bereich (905 nm). Mit den Sensoren sind 1D-Genauigkeiten von 3 mm



bis 50 mm angegeben (je nach Sensor). Für spezielle Profilmessungen bietet das Unternehmen die 2000T-Serie mit Genauigkeiten von unter 1 mm an. Die Sensoren arbeiten ohne Tags und sind dadurch auf extensive Muster- und Zielerkennung angewiesen. Das Unternehmen bietet eine entsprechende Software an, welche für die jeweilige Lösung spezifisch ist und aus den Sensordaten die nötige Prozessinformation ableitet. [32] [33] [34] [35] [36]

3.2.6 Jigsaw Positioning System (Locata / Leica)

Die Unternehmen Locata und Leica Geosystems haben in einer Kooperation ein Positioniersystem für übertägige Bergbauanwendungen entwickelt: Das Jigsaw Positioning System (JPS). Dieses System adressiert das Problem, dass GPS-Signale im Tagebau häufig nur noch eine ungenaue Ortung zulassen. Dies ist hauptsächlich auf Abschattungseffekte zurückzuführen, da aus der Grube nur noch wenige Satelliten sichtbar sind. Das Systemkonzept basiert auf sogenannten Pseudolites (Pseudo-Satelliten) [37]. Am Rand der Grube werden diese Pseudolites aufgestellt, welche dann ein Signal aussenden, das dem GPS-Signal nachempfunden ist. Zum Einsatz kommen Signale im 2,4 GHz-Bereich. Zusätzlich nutzt das System die GPS-/Galileo-/GLONASS-Signale, sofern sie nutzbar sind. Diese Pseudolites stellen die Anker des Systems dar. Die Anker können solarversorgt betrieben werden und sind ca. 5 m hoch. Die Tags bestehen aus einer zentralen Steuereinheit, welche mit einer oder zwei Antennen betrieben werden kann. Zwei Antennen erlauben die Ermittlung von Orientierungsinformationen des mobilen Geräts. Bei Tests in Tagebauen wurde als erreichbare Genauigkeit 1,2 cm ermittelt. Genaue Angaben, unter welchen Bedingungen diese Ergebnisse erzielt wurden, werden jedoch nicht gegeben; insbesondere das Konfidenzintervall für diese Genauigkeit ist nicht angegeben. Tests in einer Lagerhalle ergaben eine Genauigkeit von ca. 3 cm nach Anwendung von fortgeschrittenen Signalverarbeitungsschritten. Der Testbereich der Halle lag bei ca. 10 m × 10 m. Dies zeigt, dass das System auch ohne den Einsatz von GPS-Signalen eine hohe Genauigkeit liefern kann. [38] [39] [40]

3.3 Stand der Forschung

In diesem Abschnitt werden nun ausgewählte Ergebnisse aus der Forschung vorgestellt. Die jeweiligen Ergebnisse konzentrieren sich meist auf ein bestimmtes Frequenzband oder ein bestimmtes Verfahren und bewerten dieses hinsichtlich der Nutzbarkeit

und erreichbaren Genauigkeit. Naturgemäß ist dabei zu beachten, dass die erreichten Ergebnisse nicht ohne Weiteres auf den Serieneinsatz in der Praxis zu übertragen sind, sondern vielmehr die zugrundeliegenden Prinzipien und Technologien hinsichtlich der erreichbaren Genauigkeit bewerten.

3.3.1 Signalstärke-basierte Ortung

Verschiedene Produkte und Forschungsprojekte verwenden die Signalstärke als Maß für die Entfernungsmessung zwischen Anker und Tag. In verschiedenen Forschungsarbeiten wurde gezeigt, dass diese Technologie im untertägigen Einsatz nur schlecht einsetzbar ist. Hauptproblem ist die Wellenausbreitung in den Tunneln: Durch die Form des Tunnels entsteht eine Art Wellenleiter, welcher maßgeblichen Einfluss auf die Übertragungscharakteristik nimmt [41]. Djadel et. al untersuchten die Übertragungscharakteristiken bei 2,45 GHz und 18 GHz in untertägigen Tunneln. Im Ergebnis zeigte sich, dass die Signalstärke zwar im Mittel von der Entfernung abhängt, jedoch in keiner Weise stetig verläuft. Bei einer Entfernung von 50 m lag die Dämpfung des 2,45 GHz-Signals bei -109 dBm; die des 18 GHz-Signals bei -112 dBm [41].

Zhang et. al untersuchten ebenfalls die Ortung basierend auf Signalstärkemessungen. Sie verwendeten dafür Signale mit einer Frequenz von 900 MHz. Bei den Untersuchungen wurde zwischen verschiedenen Messorten unterschieden (u.a. eine Strecke mit einem Förderband, eine Strecke ohne Förderband, der Übergang zwischen Kopfstrecke und Streb, der Streb selbst und der Übergang zwischen Streb und Fußstrecke). In allen Fällen - bis auf den Streb selbst - zeigte sich ein ähnliches Bild wie in der vorherigen Studie: Die Abhängigkeit der Signalstärke von der Entfernung ist nicht kontinuierlich und deterministisch und daher wenig aussagekräftig. Im Streb selbst kamen die Autoren zu dem Ergebnis, dass es einen guten (und damit stetigen) Zusammenhang zwischen Entfernung und Signalstärke gibt. Die Autoren zeigen Ansätze zur Erklärung dieser Unterschiede auf: Hauptsächlich gehen sie davon aus, dass der Streb einen - verglichen mit den anderen Umgebungen - homogenen Wellenleiter darstellt. Durch die verschiedenen Objekte, welche in den sonstigen Umgebungen in unregelmäßigen Abständen abgestellt und installiert sind, ergibt sich ein sehr unregelmäßiger Wellenleiter. [42]

Weitere Studien zeigen ebenfalls einen starken Nicht-Determinismus zwischen Entfernung und der Signalstärke am Empfänger. Praktische Tests in Innenräumen und Außenumgebungen ergaben Abweichungen in der gemessenen Position von 0,9 m bis 2,4 m bei einer Experimentierfläche von bis zu 10 m. [43] [44]



Ralston et al. untersuchten die Ortung in untertägigen Umgebungen mittels Wireless-LAN. In dem Test wurden vier Access-Points in einem Tunnel auf einer Strecke von 50 m angebracht und mithilfe von RSS-Messungen die Entfernungen zu diesen gemessen. Um die Genauigkeit zu erhöhen, verwendeten die Autoren die Mapping-Methode. In dieser Methode werden die Signalstärken in einem Durchgang in einem räumlich-dichten Raster aufgezeichnet, um die späteren Messungen mit diesen Kalibrationsdaten zu kompensieren. Des Weiteren kamen Partikelfilter zum Einsatz, um dem Auftreten von Multipfad-Effekten entgegenzuwirken. Trotz des dichten Einsatzes von Basisstationen, eines Kalibrationsschrittes vorab und fortgeschrittenen Auswerteverfahren, geben die Autoren im Ergebnis eine erreichbare Genauigkeit von 2 m bis 10 m an. [5]

Das National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) hat im Jahr 2015 eine Studie zur Genauigkeit von Nahfeld-Kollisionsschutzsystemen veröffentlicht. Hierzu wählten die Autoren drei marktreife Systeme und testeten diese in fünf verschiedenen Minen untertage auf Teilschnittmaschinen. Details über die verwendeten Systeme geben die Autoren nicht bekannt. Alle Systeme haben jedoch gemeinsam, dass sie zur sogenannten zweiten Generation von Kollisionsschutzsystemen gehören, welche auf Feldstärkemessung von Magnetwechselfeldern basieren. Bei diesen Systemen werden mehrere Anker auf der zu schützenden Maschine installiert, welche ein Magnetwechselfeld ausstrahlen. Diese Magnetfelder werden von Tags, welche vom Bergmann getragen werden, detektiert und ausgewertet. Über die Feldstärkemessung kann dann die Position des Tags relativ zu den Ankern an der Maschine bestimmt werden, und somit die Position des Bergmanns relativ zur Maschine. Da Bergbaumaschinen größtenteils aus Stahl bestehen, verzerrt jede Maschine selbst das Magnetfeld, welches von solchen Systemen ausgestrahlt wird. Daher ist die Kalibrierung auf jeder Maschine entscheidend. Die Tests wurden daher in verschiedenen Konfiguration der Bergbaumaschine getestet, sodass verschiedene Arbeitsmodi abgebildet werden konnten. Dies ist deswegen interessant, da eine Veränderung der Position des Schneidarms eine Veränderung der Verzerrung des Magnetfelds hervorruft. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass 90% der Messungen eine Genauigkeit von 45,7 cm aufweisen (siehe Abbildung 3.1). Gleichzeitig stellen die Autoren heraus, dass die Genauigkeit in einigen Fällen stark sank. Eine mögliche Erklärung sei, dass in diesen Fällen der Testzeitpunkt früher lag als bei den anderen Messungen, wodurch eine zwischenzeitliche Optimierung der Systeme möglich erscheint. Gleichzeitig weisen sie darauf hin, dass weiterhin eine Unsicherheit hinsichtlich der verlässlichen Genauigkeit der Systeme besteht. [45]

Jobs et al. veröffentlichten die Testergebnisse ähnlicher Systeme. Auch sie kamen

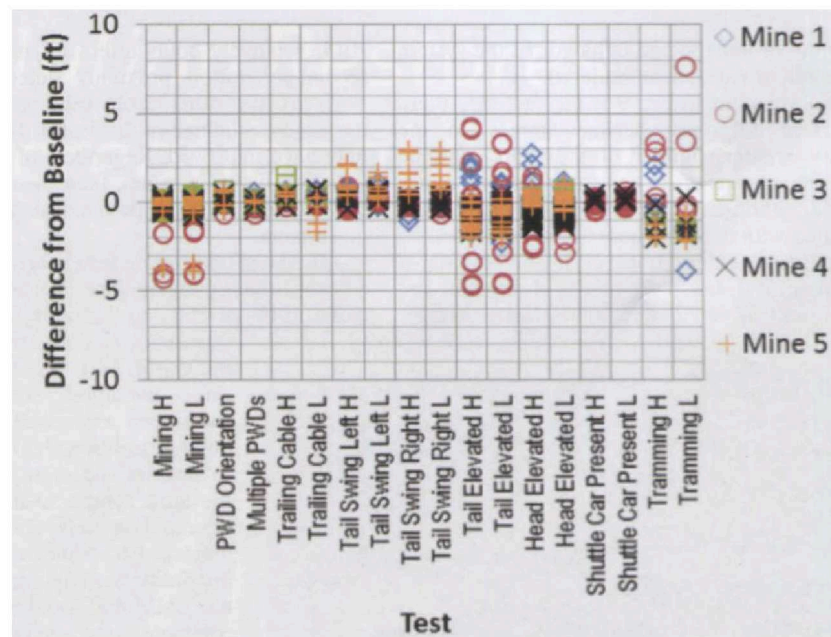


Abbildung 3.1: Genauigkeit der Kollisionsschutz-Systeme aus der NIOSH-Studie. [45]

zu dem Ergebnis, dass die Systeme eine Genauigkeit von 20 cm bis 50 cm aufweisen. [46]

3.3.2 ZigBee-basierte Positionierung

Bedford et al. untersuchten 2012 die Genauigkeit der Positionsbestimmung unter Verwendung der ZigBee-Technologie. Die Entfernungsmessung basierte auf einem ToF-Verfahren. Die Tests umfassten drei verschiedene Tunnel mit unterschiedlichen Querschnitten. Es wurden u.a. Reichweiten- und Genauigkeitsmessungen durchgeführt. Die maximale Reichweite betrug in einer Mine 200 m, in einer anderen Mine hingegen 450 m. Ein ähnliches Bild wiesen die Genauigkeitsmessungen auf: In einem Fall erreichten die Autoren 2 m Genauigkeit, in einem anderen Fall nur 10 m. Die Genauigkeit war jedoch einer hohen Varianz unterworfen, da in einigen Fällen die Genauigkeit auf mehr als 20 m abnahm. Die Autoren nennen als Ursache hauptsächlich die in den Tunneln auftretenden Multipfad-Effekte. [47]



3.3.3 Inertiale Positionsbestimmung

Im Gegensatz zu den bisher angegebenen Techniken kann eine Positionsbestimmung auch ohne den Einsatz von externer Infrastruktur erfolgen. Inertiale Messsysteme bestehen aus Beschleunigungssensoren und eventuell aus Gyroskopen. Ersterer messen Beschleunigungen, letztere messen Drehraten. Eine handelsübliche Messeinheit misst Beschleunigungen und Drehraten in jeweils drei Raumrichtungen. Über Doppelintegration der Beschleunigungen kann der zurückgelegte Weg berechnet werden. Die Integration der Drehraten berechnet die Winkelposition. Da diese Sensorik relativ einfach zu verbauen ist und auf keine externe Komponenten angewiesen ist, stellt sie in gewisser Weise die Idealvorstellung zur Ortung dar. Jedoch unterliegen diese Sensoren einer hohen Ungenauigkeit und einer Drift, die u.a. stark Temperatur- und Zeitabhängig ist. Verschiedene Forschungsprojekte haben gezeigt, dass inertielle Messsysteme nur dann sinnvoll eingesetzt werden können, wenn sie mit anderen Technologien kombiniert werden. Reid et al. zeigten, dass mit Hilfe inertialer Messsensorik Walzenlader entlang des Strebs positioniert werden können [48]. Aussagen über die absolute Genauigkeit werden jedoch nicht gegeben. Die Anwendung der Technologie für mobile Gewinnungsmaschinen evaluierten Reid et al. im Jahr 2012. Ein mobiles Fahrzeug wurde in einer übertägigen Umgebung mit inertialen Messsystemen und einem Doppler-Radar ausgerüstet. Das Doppler-Radar stützt das Inertialsystem. Die Positionsgenauigkeit geben die Autoren mit max. 30 cm an. Durch die Stützung mit dem Doppler-Radar verschlechterte sich die Genauigkeit auch nach 70 Minuten nicht wesentlich. [49] [50]

Die Inertialsensorik kann als wesentlicher Bestandteil eines Positioniersystems für mobile Betriebsmittel eingesetzt werden. Jedoch ist immer eine Stützung mit weiteren Systemen erforderlich, um ein Mindestmaß an Genauigkeit auch über eine längere Zeit zu gewährleisten.

3.3.4 FEATureFACE

In dem vom Research Fund for Coal and Steel (RFCS) geförderten Forschungsprojekt FEATureFACE wurde die Machbarkeit eines diversitär-redundanten Kollisionsschutzsystems für den untertägigen Bergbau untersucht. Im Rahmen des Projekts wurden drei verschiedene Technologien verwendet, um durch den Einsatz von Sensorfusion eine höhere Verlässlichkeit und Genauigkeit zu erreichen. Die eingesetzten Technologien waren:

- ein elektromagnetisches Positioniersystem basierend auf RSS- und ToF-Messungen zwischen Basisstationen und Tags,
- ein Radarsystem, welches die passiven Reflektionen von Objekten in der Umgebung misst und somit nicht auf Tags angewiesen ist, und
- ein akustisches System, welches auf der Basis von Schallwellen arbeitet und somit eine diversitär-redundante Technologie zu den ersten beiden darstellt, da keine elektro-magnetischen Wellen sondern mechanische Wellen verwendet werden.

Während des Projekts wurden sowohl Integrationstests auf Bergbaumaschinen als auch Tests in untertage-ähnlichen Umgebungen durchgeführt. Die 2D-Positioniergenauigkeit des Systems wurde zu 20 cm ermittelt. Der Ausfall von einem oder zweier Systeme konnte erfolgreich durch das dritte System kompensiert werden. Ein Nachteil des Gesamtsystems ist jedoch der am Ende des Forschungsprojekts noch nötige hohe Hardware-Aufwand. Die einzelnen Systeme waren als Einzelsysteme entwickelt worden und wurden daher nicht ineinander integriert. Durch eine Industrieadoption könnte jedoch eine massive Miniaturisierung und Optimierung erreicht werden, welche das System in der Praxis einsetzbar machen könnte. [51]

3.3.5 OPTI-MINE

Im Rahmen des OPTI-MINE Projekts wurde das Tracking von mobilem Equipment mit Hilfe von RFID-Technologie untersucht. Hierfür wurden RFID-Lesegeräte an bestimmten Orten im Bergwerk installiert und das mobile Equipment mit RFID-Tags ausgestattet. Durch diese Konfiguration ist eine Ortung nur grob durchführbar, nämlich derart, dass die Position eines Geräts nur im direkten Umkreis eines RFID-Lesegeräts, an welchem es gerade detektiert wird, erfasst werden kann. Hiermit kann ein Tracking und damit ein Monitoring erreicht werden, was sicherheitsrelevante Funktionen erfüllen kann (z.B. Erfassung der Personen, die einen bestimmten Bereich betreten/verlassen). Für ein einfaches Positioniersystem kann dieses System verwendet werden. Die Funktion eines vollwertigen Positioniersystems kann es jedoch nicht ersetzen. [52]



4 Entwicklung eines UWB-Positionsbestimmungssystems für die Schwerindustrie

Nachdem das vorherige Kapitel den Stand der Technik und der Forschung der funkbasierten Ortung im Schwermaschinenbau darstellte, beschreibt dieses Kapitel die Entwicklung des Ultra-Wideband (UWB)-Positionsbestimmungssystems. Zuerst werden die Grundlagen der UWB-Technologie erläutert, und anschließend aufbauend hierauf die Vorteile dieser Technologie für den Einsatz im Schwermaschinenbau erörtert. Basierend darauf können die Anforderungen an ein neuartiges UWB-Positionsbestimmungssystem formuliert werden. Anschließend stellt das Kapitel die Implementierung des Systems im Detail dar.

4.1 Einführung in die UWB-Funktechnologie

Um die Nutzung der UWB-Technologie zu bewerten, lohnt sich die Darstellung der historischen Entwicklung. Anschließend werden die technischen Grundlagen beschrieben.

4.1.1 Historische Entwicklung

Ein Funksystem wird als UWB-System bezeichnet, wenn die genutzte Bandbreite relativ zur Mittenfrequenz groß ist. Eine exaktere - wenn auch nicht allgemein gültige und anerkannte - Definition lautet: Ein Funksystem ist ein UWB-System, wenn die von ihm genutzte Bandbreite mehr als 500 MHz oder größer als 20% der Mittenfrequenz ist und dieses Sendesignal beabsichtigt erzeugt wurde [53]. Obwohl die Anfänge der UWB-Technologie schon im Jahr 1887 lagen, musste die kommerzielle Nutzung bis in die späten 1990er Jahre warten. 1887 führte Heinrich Hertz ein Experiment durch, in welchem er eine logische Konsequenz der Maxwell'schen Gleichungen zu verifizieren versuchte: die Existenz elektromagnetischer Wellen. In diesem Versuch



generierte Hertz elektromagnetische Wellen mit Hilfe eines Senders, der aus einem LC-Schwingkreis bestand, dessen Leitung an einer Stelle aufgetrennt war. An beiden offenen Enden entstanden während des Versuchs Funken, die elektromagnetische Strahlung generierten und von einem Empfänger (einem ebenfalls aufgetrennten, ringförmigen Leiter) aufgenommen wurden. Die Ähnlichkeit zur UWB-Kommunikation besteht darin, dass die ausgesendete Strahlung ebenfalls impulsförmig war und (wie wir heute mit Hilfe der Fourier-Analyse wissen) eine hohe Bandbreite nutzte.

In den folgenden Jahrzehnten entwickelte sich die Funktechnologie jedoch von der UWB-Technologie weg, da die kontrollierte Erzeugung impulsförmiger Signale technisch zu kompliziert war. Schmalbandsysteme (Systeme, welche eine relativ schmale Bandbreite verwenden) waren einfacher zu realisieren und boten eine höhere Übertragungsleistung. Erst in den 1990er Jahren rückten die UWB-Systeme aufgrund der gestiegenen Leistungsfähigkeit digitaler Systeme in den Fokus der Forschung und Entwicklung. Durch die Freigabe des Frequenzbereichs von 3,1 GHz bis 10,6 GHz für die allgemeine UWB-Nutzung erfuhr die Technologie regulatorische Rückendeckung, was den Weg zur kommerziellen Nutzung von UWB-Systemen ebnete [54]. Die folgenden Jahre zeigten ein gesteigertes Interesse an der UWB-Technologie sowohl in der Forschung als auch in der Entwicklung. Eine Suche nach dem Stichwort „UWB“ für die einzelnen Jahre zwischen 1996 und 2015 zeigt den Verlauf des Interesses an der Technologie (siehe Abbildung 4.1).

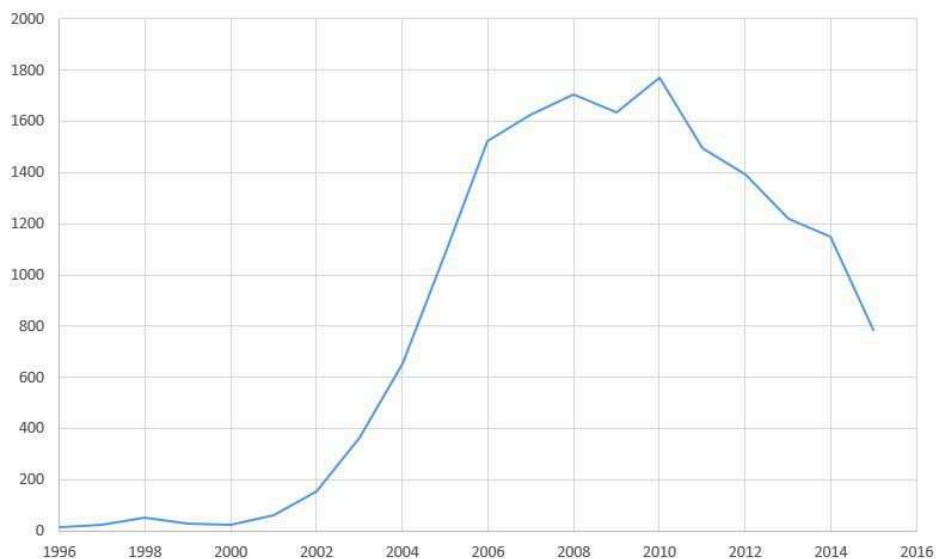


Abbildung 4.1: Suchergebnisse für das Stichwort „UWB“ auf IEEE Xplore.

Wie viele andere technische Entwicklungen auch unterliegt auch die UWB-Technologie

dem sogenannten Hype-Cycle (Abbildung 4.2). Die Hoffnungen, dass die UWB-Technologie Probleme wie z.B. die allseits verfügbare drahtlose Nahfeldkommunikation oder funkgesteuerte Sensornetzwerke löse, waren zu Beginn groß, wurden aber nicht erfüllt. Viele Forschungsprojekte wurden finanziert und erzielten gute Ergebnisse. Gleichzeitig blieben die Ergebnisse jedoch zwangsläufig hinter den viel zu hoch gesteckten Erwartungen zurück. Die Entwicklung von kommerziellen UWB-Systemen führte auch zu vielen Firmengründungen, von denen heute nur noch eine handvoll übrig geblieben ist. Grund dafür ist die schwierige und kostenintensive Entwicklung von solchen Systemen. Nach dem Durchlaufen des Zyklusses befindet sich die Technologie jedoch seit ca. Ende 2013 auf dem Anstieg zum Plateau der Produktivität. Hauptindikator hierfür ist, dass die am Markt befindlichen Unternehmen, welche die Entwicklungsphase überstanden haben, inzwischen erfolgreich serienreife UWB-Produkte vertreiben.

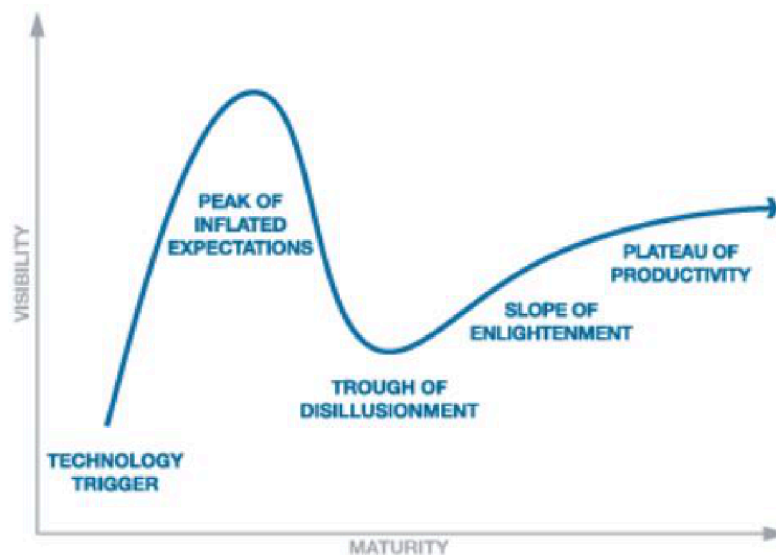


Abbildung 4.2: Hype-Cycle (nach [55]).

4.1.2 Technische Grundlagen der UWB-Funktechnologie

Durch die Kommerzialisierung der UWB-Technologie wurden immer mehr Anwendungsfelder in Hinblick auf die Nutzung von UWB-Systemen untersucht. Für Kurzstrecken-Datenübertragungssysteme hat sich die UWB-Technologie zu einer konkurrenzfähigen Alternative zu den existierenden Systemen entwickelt. Im Bereich der Low-Power-Systeme sind hier die bekannten Systeme wie ZigBee, Bluetooth und



6LoWPAN zu finden. Hier etabliert sich zunehmend auch die UWB-Technologie und kann insbesondere dadurch punkten, dass im laufenden Betrieb sowohl stromsparende Datenübertragung als auch hohe Bandbreiten flexibel eingesetzt werden können. Viele andere Technologien bieten entweder nur das eine oder das andere.

Funksysteme zur Kommunikation können nach verschiedenen Gesichtspunkten kategorisiert werden. Ein Aspekt ist das verwendete Modulationsverfahren. Üblicherweise verwenden die meisten Systeme eine Trägerfrequenz, auf die die Nutzinformation aufmoduliert wird. Diese Systeme sind sogenannte Schmalbandsysteme, da sie nur ein schmales Frequenzband zur Übertragung nutzen. Ein bekanntes Beispiel ist das FM-Radio, welches heutzutage den Rundfunk-Standard darstellt. Die Trägerfrequenz kann variiert werden, was einer Senderwahl entspricht. Der zulässige Bereich hierfür ist 87,5 MHz bis 108 MHz. Auf diese Trägerfrequenz werden nun die Nutzdaten aufmoduliert. Hierfür wird die Frequenzmodulation (FM) verwendet. Dieses Verfahren variiert die Trägerfrequenz in einem zulässigen Bereich von 100 KHz. Der Empfänger synchronisiert sich anhand von im Sendesignal eingebetteter Synchronisierungsinformationen auf die eingestellte Frequenz und demoduliert die Nutzinformationen, welche dann wiedergegeben werden. Neben der FM gibt es unter Anderem noch Amplitudenmodulation (AM) und Phasenmodulation (PM). All diesen Verfahren liegt zugrunde, dass eine feste Trägerfrequenz verwendet wird, auf die sich der Empfänger synchronisieren muss und auf die die Nutzinformation aufmoduliert wird. Es werden jedoch immer verhältnismäßig schmale Frequenzbänder verwendet.

UWB-Systeme verwenden ein - verglichen mit Schmalbandsystemen - breites Frequenzband. Hierdurch ergeben sich spezifische Vorteile, auf welche später noch eingegangen wird. Die Erzeugung eines solchen Signals kann durch verschiedene Methoden erreicht werden. Die erste Möglichkeit ist die konsequente Erweiterung eines Schmalbandsystems, sodass es auf mehreren schmalen Frequenzbändern gleichzeitig sendet. Damit wird ein insgesamt sehr viel breiteres Frequenzband genutzt. Die nächste Möglichkeit ist das Direct-Sequence Spread-Spectrum (DSSS)-Verfahren. Hierbei wird eine höhere Bandbreite verwendet, als für die Übertragung nötig ist. Dadurch ergibt sich ein quasi-stochastisches Signal welches übertragen wird. Die dritte Möglichkeit bildet die Grundlage für die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten UWB-Systeme: Impuls-Radio (IR)-UWB-Systeme. Hierbei wird die zu übertragende Information in ultrakurze Pulse gewandelt und dadurch übertragen. Die Nutzung dieser Methodik ist auch in der IEEE802.15.4a als die Methode der Wahl definiert, um UWB-Systeme zur Lokalisierung und Datenübertragung zu realisieren. [56]

Ein Vorteil der UWB-Technologie bezogen auf Positioniersysteme liegt darin, dass

durch die Verwendung von kurzen Pulsen die Zeit, zu der eine Nachricht empfangen wird, sehr genau bestimmt werden kann. Die kurzen Pulse und die hohe Bandbreite sind dabei notwendig miteinander verknüpft, wie der Ähnlichkeitssatz der Fourier-Analyse zeigt:

$$f(\alpha t) \circ \frac{1}{|\alpha|} F\left(\frac{\omega}{\alpha}\right). \quad (4.1)$$

Dieser Ähnlichkeitssatz (Abbildung 4.3) besagt, dass je kürzer ein Puls im Zeitbereich ist, desto breiter ist der von ihm belegte Frequenzbereich. Damit wird ersichtlich, warum IR-UWB-Systeme eine so hohe Bandbreite verwenden.

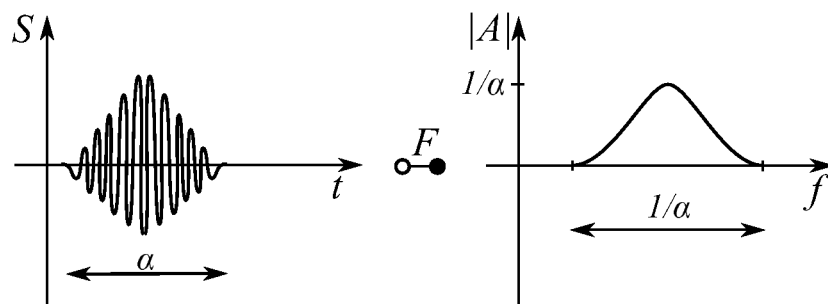


Abbildung 4.3: Ähnlichkeitssatz der Fourier-Transformation. Eine Stauchung im Zeitbereich führt im Frequenzbereich zu einer Streckung der Frequenz und einer Verstärkung der Amplitude.

Die Verwendung von kurzen Pulsen zur Informationsübertragung bringt ebenfalls Vorteile bei der Störanfälligkeit durch Reflektionen. Bei allen Funksystemen, die in der Realität (also nicht in Antennenmesskammern oder in einem idealen Freifeld) eingesetzt werden, treten Reflektionen auf. Das Signal wird an Objekten in der Umgebung reflektiert und auf unterschiedlichste Art und Weise wieder in die Umgebung abgestrahlt. Dieser Prozess ist stochastisch und nicht analytisch erfassbar. Das Empfangsbild, welches sich beim Empfänger ergibt, weist eine Überlagerung aller Ausbreitungswege (direkter Pfad und alle reflektierten Pfade) auf. Dieser Effekt wird Multipfad-Effekt genannt. Die Überlagerung wird vom Empfänger verarbeitet, welcher versucht, die Synchronisationsinformationen zurückzugewinnen. Im idealen Fall (also ohne Überlagerung) kann dies ohne Probleme geschehen. Falls jedoch eine Überlagerung auftritt, kann es sein, dass das Signal derart verzerrt wird, dass die entscheidenden Informationen nicht mehr rekonstruiert werden können. Gerade bei Schmalbandsystemen tritt dieses Problem auf, da der Träger die ganze Sendezeit über aktiv ist und hieraus keine Synchronisationsinformationen gewonnen werden können. Bei IR-UWB-Systemen werden die Pulse so kurz gewählt, dass eine Unterscheidung der reflektierten Pulse auch nach erfolgter Überlagerung möglich wird. [57]



4.1.3 Anwendungen der UWB-Technologie

Die UWB-Technologie kann zur reinen Datenübertragung eingesetzt werden. Diese Systeme verwenden allerdings keine IR-UWB-Systeme, sondern Modulationsverfahren, welche vor allem zur Datenübertragung mit hohen Datenraten geeignet sind. Ein Beispiel ist der Wireless-USB Standard, welcher UWB-Verfahren zur Datenübertragung einsetzt. Dieser Standard erlaubt die drahtlose Übertragung mit bis zu 480 Mbit/s. [58] Besonders interessant wird die UWB-Technologie allerdings, wenn Positionsinformationen für die Anwendung relevant sind. Durch die inhärente Möglichkeit Entfernungen mit vergleichsweise hoher Genauigkeit zu messen, bietet diese Technologie einen entscheidenden Vorteil gegenüber anderen Technologien: Die Lokalisierung und Kommunikation von und mit Objekten in weitläufigen Gebäuden (wie z.B. Krankenhäusern) wird ermöglicht [59]. Auch im Außenbereich kann die Technologie eingesetzt werden, beispielsweise zur Überwachung von Viehherden. Durch die Positionierfähigkeit können die Bewegungen der Tiere verfolgt werden und durch die Datenkommunikation werden Sensordaten wie z.B. Temperatur übertragen. Dadurch kann auf den Gesundheitszustand der Tiere geschlossen werden, ohne jedes Tier einzeln untersuchen zu müssen [60]. Eine ganze Klasse von Anwendungsfällen ergibt sich für Positionieraufgaben, in welchen nicht auf GPS zurückgegriffen werden kann. Dies ist vor allem bei lokalen Positionieraufgaben der Fall, wo es keine weiteren Informationen zur Stützung des GPS-Signals gibt. Ein Beispiel ist die Lokalisation von Ersthelfern am Einsatzort, um deren Sicherheit sicherstellen zu können. Ein solches System wurde exemplarisch von Huseth et al. entwickelt und am Beispiel der Feuerwehr vorgeführt. Das UWB-System wird bei einem Einsatz vor dem Einsatzort aufgestellt und kann anschließend die Einsatzkräfte innerhalb des Gebäudes lokalisieren und Vitalwerte übertragen. Damit hat der Einsatzleiter stets den Überblick über den Zustand der Einsatzkräfte vor Ort [61].

4.2 Bewertung der UWB-Funktechnologie für die Nutzung in der Schwermaschinenindustrie

Die Anforderungen an Automatisierungssysteme im Schwermaschinenbau sind relativ speziell und hoch. Ein solches System muss in der Lage sein auch unter widrigen Bedingungen (Staub, Wasser, Nebel) und heftigen mechanischen Vibrationen zu funktionieren. Ebenso sind die Umgebungen oft metallisch und mechanisch hart. Dies hat maßgeblichen Einfluss auf die Reichweite und die Qualität von Funksys-

temen, wie weiter oben schon in Bezug auf Multipfad-Effekte beschrieben wurde. Hier scheint UWB ein idealer Kandidat zu sein, um die Anforderungen erfüllen und gleichzeitig einen entscheidenden Mehrwert bieten zu können: Den Mehrwert der parallelen Ortung und Datenübertragung. Speziell im Bergbau können durch den Einsatz von Funktechnologie Kosten an der Infrastruktur gespart werden. Während übliche Industrie-Infrastruktur zwischen 130 US\$ und 650 US\$ pro Meter kostet, können durch den Einsatz von entsprechender Funktechnologie 20 % bis 80 % der Kosten eingespart werden [62]. Der geringe Energiebedarf der Technologie erlaubt es außerdem, unter ATEX-Bedingungen zertifiziert und eingesetzt werden zu können. Gerade für die Chemieindustrie und den untertägigen Kohlebergbau ist dies von Interesse.

Verschiedene Untersuchungen zeigen, dass die UWB-Technologie auch für den untertägigen Bergbau vielversprechend ist:

Chehri et al. untersuchten die Übertragung von UWB-Signalen in untertägigen Tunneln. Nach der Analyse von einigen Tunneln erstellten Sie ein Kanalmodell und simulierten die erreichbaren Datenraten. Im Ergebnis erreichten sie gute Werte bis zu 60 Mbit/s und empfehlen die UWB-Technologie für den Einsatz in untertägigen Minen. [62]

Chunming simulierte die Positioniergenauigkeit unter Verwendung von UWB-Signalen. Abhängig von der Anzahl der verfügbaren Ankerknoten betrug die erreichbare Genauigkeit 1 m bis 6 m. [63]

El Khaled et al. untersuchten die Performance von UWB-Signalen zur Datenkommunikation in untertägigen Minen unter Line-of-Sight (LOS) und Non-Line-of-Sight (NLOS)-Bedingungen. Abhängig vom Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR) betrug die Kanalkapazität bei Entfernungen unter 12 m bis zu 20 Gbit/s. [64]

Neumann et al. zeigten die Nutzbarkeit von UWB-Systemen zur Automatisierung im untertägigen Bergbau anhand von kommerziell nutzbaren Systemen. Untersucht wurden die Genauigkeit der Entfernungsmessung sowie die Robustheit gegenüber Umwelteinflüssen. Die erreichte Genauigkeit betrug 0,2 m, wobei das verwendete Referenzsystem diese Ungenauigkeit aufwies und keine höhere Präzision untersucht werden konnte. Das System funktionierte auch bei heftigem Regen einwandfrei. [65]

Saidi et al. zeigten - ebenfalls basierend auf einem kommerziellen UWB-System - die Nutzbarkeit der Technologie für die Bauwirtschaft. Sie testeten die 2D- und 3D-Positioniergenauigkeit eines UWB-Systems auf einer Außenlagerfläche. Die erreichten Genauigkeiten lagen für den 2D-Fall bei 0,7 cm im besten und bis zu 34,8 cm im schlechtesten Fall; im 3D-Fall betragen die Fehler 0,6 cm bis 152 cm.



Verschiedene Autoren befassten sich mit der Kanalmodellierung für UWB-Übertragungen im untertägigen Bergbau. In dieser Arbeit soll nicht weiter auf die Kanalmodellierung eingegangen werden. Der Vollständigkeit halber seien die Fundstellen jedoch aufgeführt. Um eine Kanalmodellierung durchzuführen, können diese Fundstellen als Basis verwendet werden: [66] [64] [67] [68] [69] [70] [71].

4.3 Verfügbare UWB-Systeme

Da die Entwicklung eines leistungsfähigen UWB-Systems zur Lokalisierung einen großen Aufwand darstellt, haben es nur eine handvoll Unternehmen geschafft, ein solches Produkt anzubieten. Im Rahmen dieser Arbeit werden zwei Systeme verwendet und bewertet. Die Wahl fiel auf diese Systeme, da sie die einzigen Systeme am Markt waren, welche die Anforderungen des zu entwickelnden Positioniersystems hinsichtlich Größe, individueller Konfigurierbarkeit und Schnittstellen erfüllten.

4.3.1 TimeDomain P410 Ranging and Communication Module

Das TimeDomain P410 Ranging and Communication Module (P410) ist ein Ultra-Widebandsystem der US-Amerikanischen Firma TimeDomain⁽ⁱ⁾. Der Haupteinsatzzweck dieses Systems ist die hochpräzise Entfernungsmessung mit der Möglichkeit zur Datenübertragung. Es verwendet eine Funkbandbreite von 2 GHz: 3,1 GHz bis 5,1 GHz. Das System ist in Abbildung 4.4 dargestellt.

Das P410 besteht aus einem Printed-Circuit-Board (PCB), auf welchem fast alle für den korrekten Betrieb notwendigen Komponenten vereint sind. Dieses PCB weist die Dimensionen 76 mm x 80 mm x 16 mm auf (ohne externe Anschlüsse). Für den Betrieb sind zusätzlich noch eine Spannungsversorgung und eine Antenne notwendig. Die Spannungsversorgung muss eine Spannung im Bereich von 5,75 V bis 30 V bei einer maximalen Leistung von 4,2 W liefern. Die Antenne wird beim Kauf eines Systems mitgeliefert und stellt damit die Standard-Antenne für das System dar. Um eine Applikationslogik anzuschließen, kann entweder die USB-Schnittstelle oder die integrierte UART-Schnittstelle mit CMOS-TTL-Logik verwendet werden. Weiterhin besitzt das System einen aktiven Lüfter (nicht in der Abbildung zu sehen), welcher den stabilen Betrieb auch bei erhöhten Umgebungstemperaturen ermöglichen soll. Der Hersteller weist jedoch darauf hin, dass dieser Lüfter nicht zwingend nötig ist.

⁽ⁱ⁾<http://www.timedomain.com>.



Abbildung 4.4: TimeDomain P410 Ranging and Communication Module (P410).

Jedes Modul hat eine frei programmierbare ID, welche die Identifikation eines bestimmten Moduls in der Applikation möglich macht. Diese ID wird bei jeder Übertragung mitgesendet, sodass alle empfangenden Module entscheiden können, ob sie antworten müssen oder nicht. Das P410 verwendet TWR-ToF-Messungen, um die Entfernung zu einem entfernten Modul zu bestimmen. Die Struktur einer Übertragung ist in Abbildung 4.5 skizziert. Mit den Präambel-Informationen kann der Empfänger auf die Wellenform synchronisieren. Der UWB-Kernel enthält spezielle Informationen, um den Empfänger über Charakteristiken der Wellenform zu informieren, sodass die Qualität der Messung erhöht werden kann. Genaue Informationen hierüber werden durch den Hersteller nicht bekannt gegeben, da sie einen Kernteil der Qualität des Produkts darstellen. Der dritte und vierte Teil sind optional. Beide enthalten entweder Scan-Informationen oder Benutzerdaten. Scan-Informationen können übertragen werden, um Analysen über die Kanalqualität durchzuführen; über die Benutzerdaten kann eine Kommunikationsstrecke aufgebaut werden.

Um den SNR der Messung zu erhöhen, kann eine sogenannte Integrationsrate konfiguriert werden. Diese führt dazu, dass alle zu übertragenden Signale mehrfach hintereinander übertragen werden. Durch eine exakte Korrelation der mehrfach empfangenen Signale kann am Empfänger das Signal auch bei erhöhtem Rauschen korrekt empfangen werden. Da hierbei alle Signale mehrfach übertragen werden müssen, sinkt die Messrate des Systems. Derzeit ist eine maximale Integrationsrate von 512



konfigurierbar.

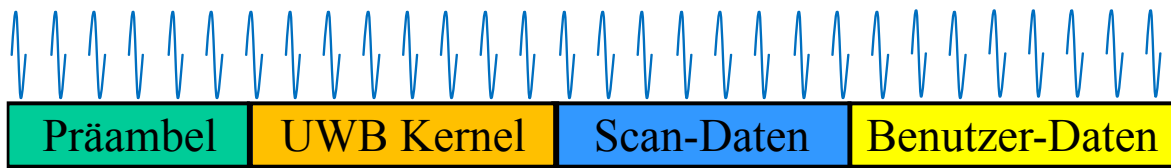


Abbildung 4.5: Paketstruktur einer P410-Übertragung. [72]

4.3.1.1 TimeDomain UWB Broadspec Antenna

Die standardmäßig mit dem P410 mitgelieferte Antenne ist die TimeDomain UWB Broadspec Antenna (Abbildung 4.6). Diese Antenne liefert einen durchschnittlichen Antennengewinn von 3 dBi, wobei eine Ausrichtung zweier Antennen mit den Flächen parallel zueinander einen Gewinn von ca. 6 dB erbringt. Die Antenne weist in Azimuth-Richtung eine fast-isotrope Richtcharakteristik auf (Abbildung 4.7). In Elevation-Richtung ist die Richtcharakteristik jedoch stark winkelabhängig (Abbildung 4.8). Dies hat zur Folge, dass bei Einsatz dieser Antenne auf die Ebene, in welcher sich die UWB-Module befinden, geachtet werden muss, sodass diese mit den Antennenebenen zusammenfällt.



Abbildung 4.6: TimeDomain UWB Broadspec Antenna. [73]

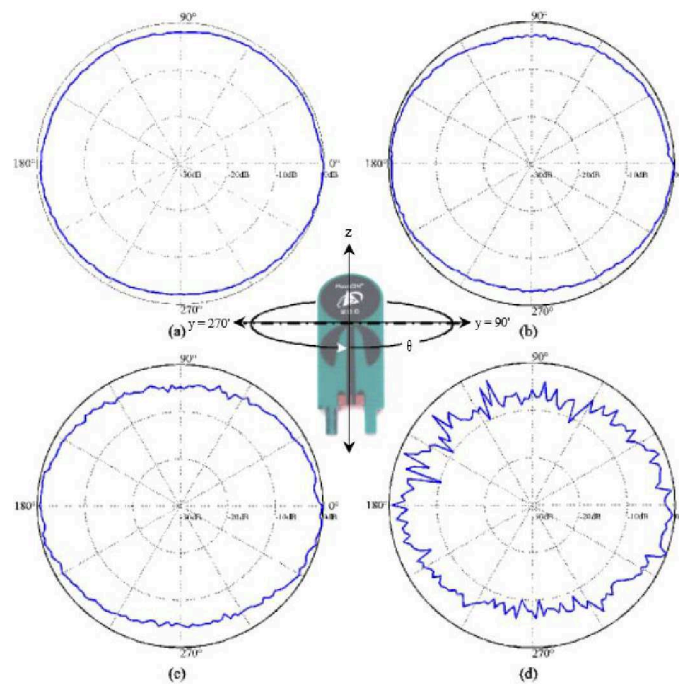


Abbildung 4.7: Richtcharakteristik der TimeDomain UWB Broadspec-Antenne in Azimuth-Richtung. [73]

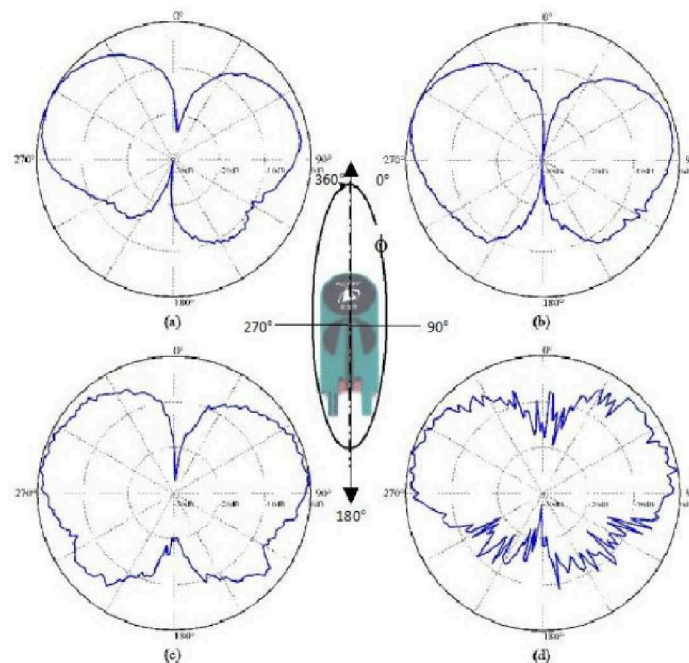


Abbildung 4.8: Richtcharakteristik der TimeDomain UWB Broadspec-Antenne in Elevation-Richtung. [73]



4.3.1.2 Integrationslevel

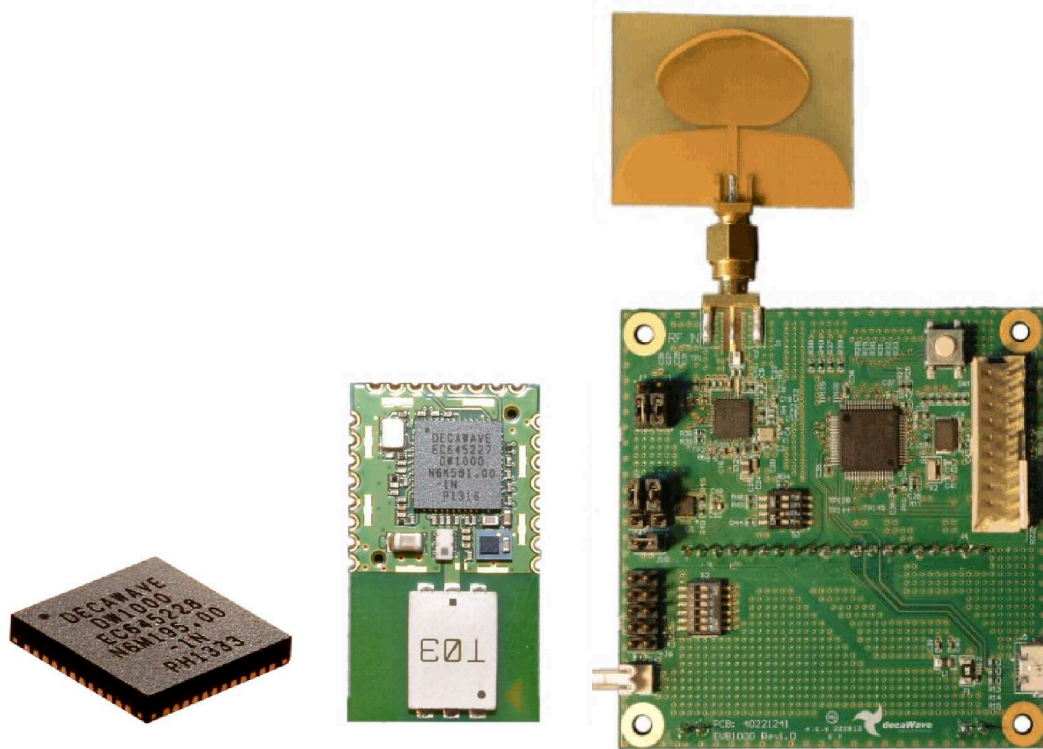
Das P410 bietet alle nötigen Funktionseinheiten, um eine Komplettlösung zur UWB-Entfernungsmessung liefern zu können. Über ein entsprechendes Application Programming Interface (API) kann das Modul konfiguriert werden, und anschließend können darüber Entfernungsmessungen initiiert und Daten übertragen werden. Das Modul gibt während des Betriebs Statusmeldungen aus, auf die der Messrechner reagieren kann/muss. Darüber hinaus bietet das P410 die Möglichkeit die empfangene Wellenform auszugeben. Damit lässt der Hersteller den (begrenzten) Zugriff auf die unteren Schichten zu und ermöglicht die Entwicklung von eigenen Algorithmen, welche auf der Analyse von Rohdaten/Wellenformen basieren.

4.3.2 Decawave DW1000 ScenSor-Chip

Der Decawave DW1000 ScenSor-Chip (DW1000) ist ein UWB-Transceiverchip der Firma Decawave Ltd⁽ⁱⁱ⁾. Die Firma bietet Integrated Circuits (ICs) zur Indoor-Lokalisierung basierend auf UWB-Technologie an. Dieser Chip stellt das zentrale Element aller von Decawave angebotenen Lösungen dar. Der Ansatz des Unternehmens ist dabei ein grundlegend anderer als der von TimeDomain. Ziel von Decawave ist es, dem Kunden eine individuell integrierbare und möglichst stromsparende Lösung anzubieten, damit dieser eigene Lösungen basierend auf UWB-Technologie aufbauen kann. Daher enthält der DW1000-Chip beinahe alle nötigen Elemente, um eine UWB-Übertragung im Bereich zwischen 3,5 GHz und 6,5 GHz zu ermöglichen - das einzige Bauteil, welches für eine Übertragung fehlt, ist die Antenne. Der Chip arbeitet nach dem IEEE802.15.4-2011-Standard und ist damit konform zur EU-Richtlinie für UWB-Funksysteme. Datenübertragungen sind mit bis zu 6,8 Mbit/s möglich. Entfernungsmessungen sind mit einer Genauigkeit von 10 cm angegeben. Die Versorgungsspannung des Chips beträgt 2,8 V bis 3,6 V. Die Stromaufnahme wird angegeben mit mindestens 31 mA im Sende- und mindestens 64 mA in Empfangsbetrieb. Um lange Batterielaufzeiten zu ermöglichen, kann der Chip in einen Schlafmodus versetzt werden, in welchem er 2 μ A verbraucht. [74]

Basierend auf dem DW1000-Chip sind einige Lösungen erhältlich, um die Leistungsfähigkeit der Technologie beurteilen zu können. Es wird ein Evaluation-Board angeboten: das EVB1000 (Abbildung 4.9c). Dieses Board beinhaltet alle nötigen Komponenten, um eine Entfernungsmessung über UWB zu ermöglichen (inklusive des DW1000-Chips). Zwei EVB1000-Boards in Kombination bilden das EVK1000-Evaluation-Kit.

⁽ⁱⁱ⁾<http://www.decawave.com>.



(a) Decawave DW1000. (b) Decawave DWM1000. (c) Decawave EVB1000.

Abbildung 4.9: Auszug aus dem Decawave-Produktsortiment basierend auf dem Decawave DW1000 ScenSor-Chip.

Mit diesem Kit kann die Performance des DW1000-Chips evaluiert werden, ohne dass eine eigene Platinenentwicklung betrieben werden muss. Eines der EVB1000-Boards, welches als mobiler Tag fungieren soll, wird über USB an den Messrechner angeschlossen. Das andere EVB1000 muss als Anker konfiguriert und mit Spannung versorgt werden. Der Tag misst anschließend dauerhaft die Entfernung zu dem Anker und gibt die Ergebnisse über eine virtuelle UART-Schnittstelle auf dem Messrechner aus.

Als Kompromiss zwischen dem DW1000-Chip und dem EVB1000 wird das DWM1000 (DWM1000) angeboten (Abbildung 4.9b). Dieses Modul ist ein kleines (23 mm x 13 mm x 3 mm) Printed-Circuit-Board (PCB), auf welchem ein DW1000-Chip, eine keramische Antenne und notwendige Randbeschaltung enthalten sind. Damit bietet es eine Lösung, um eigene UWB-Systeme aufzubauen, ohne sich mit Antennen-/Hochfrequenzdesign auseinandersetzen zu müssen, und setzt damit die Einstiegshürde für ein auf dem DW1000-Chip basierendes System drastisch herab. [75]



Die Struktur einer DW1000-Übertragung ist ähnlich der des P410-Moduls. Ein wichtiger Unterschied jedoch ist, dass DW1000-Übertragungen nach dem IEEE802.15.4-2011-Standard aufgebaut werden können. Die Struktur ist in Abbildung 4.10 dargestellt. Zu Beginn der Übertragung steht wieder die Präambel, mit welcher sich der Empfänger auf die Wellenform synchronisiert. Anschließend werden Parameter der Übertragung gesendet, welche der Empfänger benötigt, um die Wellenform korrekt zu interpretieren. Anschließend können Benutzerdaten angehängt werden. Die EVB1000-Boards verwenden eine IEEE802.15.4-konforme Übertragung. Bei Verwendung des DWM1000-Moduls oder des DW1000-Chips muss der Nutzer diesen Standard händisch umsetzen. Decawave stellt jedoch Quellcode für die einfachere Adaption bereit.

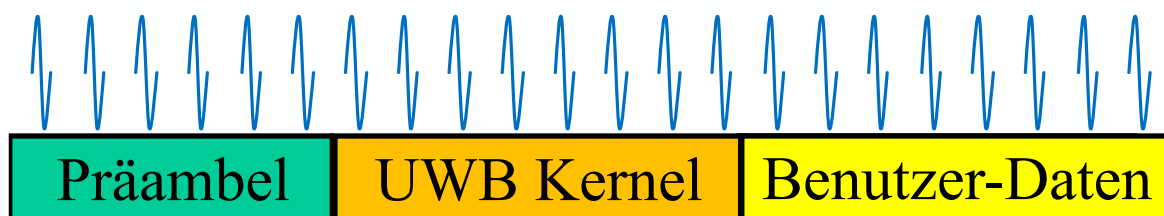


Abbildung 4.10: Struktur einer DW1000-Übertragung nach dem IEEE802.15.4-Standard. [76]

4.3.2.1 DWM1000-Antenne

Durch die fehlende Notwendigkeit eines eigenen, geeigneten Antennendesigns beim Einsatz des DWM1000 stellt dieses Modul die interessanteste Alternative für den Aufbau eines UWB-Systems basierend auf dem DW1000-Chip dar. Entscheidend für die Performance des Systems ist natürlich die Antenne. Die Richtcharakteristik dieser ist in Abbildung 4.11 dargestellt. Hauptunterschied zur Timedomain Broadspec Antenne ist, dass die DWM1000-Antenne isotrop abstrahlt, also nicht nur in einer Ebene.

4.3.2.2 Integrationslevel

Das DWM1000-Modul bewegt sich auf einem niedrigeren Integrationslevel als das P410. Es bedient sowohl die physikalische Schicht, um die UWB-Wellenform zu erzeugen, als auch die MAC-Schicht, welche für die Segmentierung und die Paketierung zuständig ist. Darüber hinaus ist es die Aufgabe des Anwenders/Entwicklers, einen

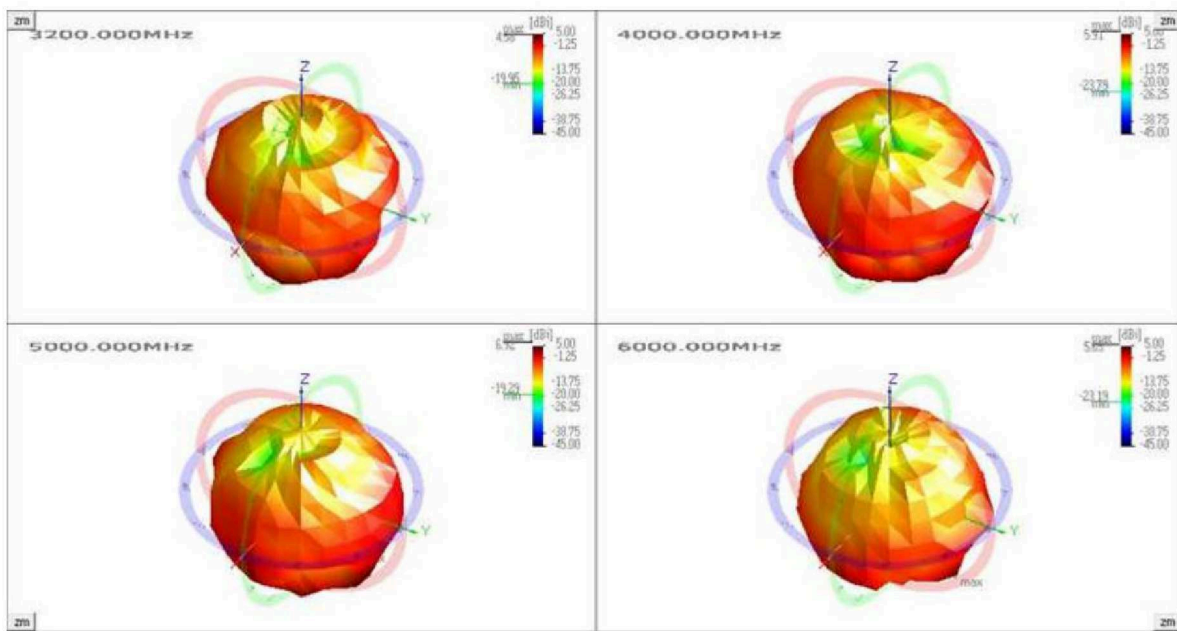


Abbildung 4.11: Richtcharakteristik der Antenne des Decawave DWM1000-Moduls. [75]

geeigneten TWR-Algorithmus (oder auch einen anderen geeigneten Algorithmus zur Entfernungsmessung) zu implementieren. Hieraus ergibt sich der direkte Nachteil, dass der initiale Entwicklungsaufwand wesentlich höher ist, um auf Basis des DW1000 ein System zur Entfernungsmessung aufzubauen. Dem gegenüber steht jedoch die wesentlich bessere Integrierbarkeit.

4.4 Kalibrierung von UWB-Systemen

Wie bei fast allen technischen Systemen, welche auf Basis analoger Messgrößen funktionieren, muss auch ein UWB-System kalibriert werden. Dies liegt hauptsächlich an den notwendigen Bauteilen im HF-Frontend (Antenne, Trimmkondensatoren, etc.), welche naturgemäß Produktionstoleranzen unterliegen. Diese Toleranzen bedingen systematische Abweichungen, welche schließlich zu einer Zeitverzögerung im gemessenen Signal führen. Diese Verzögerung kann nachträglich rechnerisch kompensiert werden. Neben den zuvor genannten Ungenauigkeiten wirkt sich der stochastische Fehler eines Messsystems ebenfalls negativ auf die Messung aus. Dieser ist jedoch nicht systematisch und kann daher nicht a-priori kompensiert werden. Er kann jedoch durch den Einsatz geeigneter Filterung minimiert werden (siehe Kapitel 4.6).



Zudem hat die Signalstärke, mit welcher das UWB-System sendet, einen Einfluss auf die erreichbare Genauigkeit. Dies hängt damit zusammen, dass im empfangenen Signal eine bestimmte Flanke im Signal identifiziert wird, welche der Ermittlung des Empfangszeitpunkts dient. Die verwendete Sendeleistung hat einen Einfluss auf die Genauigkeit dieser Detektion. Solange darauf geachtet wird, dass die standardmäßig verwendete Sendeleistung verwendet wird, kann man sich auf die Standard-Korrekturfaktoren, welche ab Werk in die Systeme einprogrammiert werden, verlassen und eine weitere Betrachtung dieses Fehlers ist nicht nötig. Bei der Verwendung von anderen Sendeleistungen müssen diese Kompensationsparameter empirisch bestimmt werden. [77]

Eine weitere Fehlerquelle ist die Temperaturabhängigkeit der Messung. Dies kann sowohl eine systematische als auch eine stochastische Quelle sein. In Fällen, in denen die Temperatur jederzeit exakt bekannt ist, kann sie als systematisch angesehen werden und kompensiert werden. Ist dies nicht der Fall, ist die Systematik dieses Fehlers für das Auswertesystem nicht gegeben und muss daher als stochastisch angesehen werden. [77]

Ein wichtiger Teil bei der Kalibration ist ebenfalls der UWB-Übertragungskanal. Die Eigenschaften des Kanals sind je nach Umgebung sehr unterschiedlich. Es kann durchaus sinnvoll sein, die Kalibration nicht im Labor vor der Messung durchzuführen, sondern nach erfolgter Installation in der applikationsspezifischen Umgebung.

4.4.1 Einfluss der Antennenverzögerung

An einer Entfernungsmessung sind immer zwei Module beteiligt. Wenn die Messung ein TWR-Verfahren verwendet (was im Rahmen dieser Arbeit vorausgesetzt wird), sind die Kalibrationsfaktoren beider beteiligten Module notwendig. Die gemessene Laufzeit setzt sich damit wie folgt zusammen:

$$t_{meas} = t_{delay,A} + t_{TOF} + t_{delay,B} \quad (4.2)$$

Wenn die Antennenverzögerungen der beiden Module bekannt ist, können diese von der gemessenen Zeit subtrahiert werden. Damit erhöht sich die Genauigkeit der Messung erheblich. Decawave gibt einen Genauigkeitsgewinn von ca. 25 cm durch die erfolgreiche Kalibration der Antennenverzögerung an. [77]

4.4.2 Durchführung der Antennen-Kalibration

Die Bestimmung der Antennenverzögerung setzt nach Gleichung 4.2 die Kenntnis der Verzögerung des anderen Moduls voraus. Falls ein solches so genanntes *Gold-Modul* vorhanden ist, kann eine Messung zwischen diesem und dem zu kalibrierenden Modul durchgeführt werden. Hierzu werden die beiden Module in einem exakt bekannten Abstand zueinander aufgestellt und eine stochastisch relevante Anzahl an Messwerten aufgezeichnet (üblich sind 100 bis 1000 Messwerte). Der Aufbau für eine solche Messung ist in Abbildung 4.12 dargestellt.

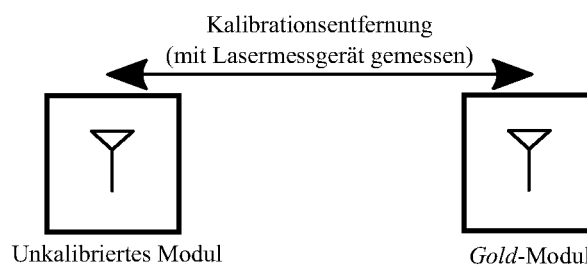


Abbildung 4.12: Aufbau zur Kalibration eines UWB-Moduls.

Der Ablauf der Kalibration kann anschließend wie folgt durchgeführt werden:

- Aufstellen der beiden Module und exaktes Ausmessen des Abstands (z.B. mit einem Laserdistometer).
- Setzen der Antennenverzögerung auf einen Standardwert.
- Durchführen von 100 bis 1000 Messwerten.
- Bestimmung des Mittelwerts der Abweichung zwischen Messung und exakter Referenz.
- Einspeicherung der tatsächlichen Antennenverzögerung im zu kalibrierenden Modul.

Falls kein Referenzmodul (also ein Modul, auf welchem die Kalibration bereits vollzogen und gespeichert wurde) vorhanden ist, kann ein solches über das folgende Verfahren erzeugt werden. Es werden drei Module benötigt. Diese werden der Einfachheit halber in einem gleichschenkligen Dreieck voneinander aufgestellt, sodass die Distanzen zwischen den Modulen gleich sind. Anschließend werden für alle Permutationen die Entfernungen mehrfach gemessen (z.B. wie oben 100 bis 1000 Messwerten). Über ein Minimierverfahren kann dann die insgesamt beste Antennenverzögerung für jedes Modul ermittelt werden. Details über das Verfahren werden in [78] beschrieben.



4.5 Implementierung des Positioniersystems

Die Entwicklung eines neuen Positioniersystems, welches auf der UWB-Funktechnologie basiert, wird in diesem Kapitel eingehend beschrieben. Hier wurden zwei Entwicklungswege parallel beschrrieben:

- Ein voll-integriertes, in der Praxis einsetzbares Positioniersystem basierend auf dem P410-System und
- eine Evaluierung der Genauigkeit des EVB1000-Systems.

Die Gründe hierfür sind, dass zum Zeitpunkt des Entwicklungsstarts nur das P410-System verfügbar war. Das P410 stellt die Basis für ein einsatzfähiges System dar. Im späteren Verlauf war ebenfalls das Decawave-System verfügbar. Deshalb wurden im weiteren Verlauf auch Messungen mit dem EVB1000-System durchgeführt, um die Systeme vergleichen und eine Entscheidung treffen zu können, welches System für welche Anwendung besser geeignet ist.

4.5.1 Anforderungen

Die Anforderungen, die sich für das System ergeben, sind weitgehend die üblichen Anforderungen im Schwermaschinenbau: An erster Stelle muss eindeutig die Robustheit stehen. Das System muss imstande sein, widrigen Umgebungsbedingungen wie Staub- und Nebelbelastung, mechanischen Stößen und Vibrationen zu widerstehen und funktionstüchtig zu bleiben. Auch die Qualität der Ortung darf durch diese Umwelteinflüsse nicht beeinträchtigt werden.

Um das System in der Praxis einsetzen zu können, muss auch auf die vielfältigen Anforderungen an Schnittstellen eingegangen werden. Ob z.B. eine PROFIBUS- oder ProfiNet-Schnittstelle eingesetzt wird, ist für das Positioniersystem in erster Linie nicht von Relevanz. Jedoch ist jedes System immer nur so gut, wie seine Einsetzbarkeit in praktischen Szenarien. Daher ist eine Trennung des Ortungsteils und des Schnittstellenteils des Systems wichtig. Damit kann der Ortungsteil wiederverwendet werden, auch wenn sich die Schnittstelle für eine neue Anwendung ändert.

Die Größe des implementierten Systems ist je nach Anwendungsfall mal von vor- und mal von nachrangigem Interesse. Soll das System auf einem Absetzer installiert werden, ist meist genug Bauraum vorhanden, um auch größere Gehäuse anzubringen. Soll das System auf einer kleineren untertägigen Maschine installiert werden, ist der Bauraum meist sehr knapp. Hier müssen der Formfaktor und das Gehäuse des Systems klar der Applikationsanforderung folgen. Aus dieser Anforderung ergibt sich

hauptsächlich die Motivation, neben dem Timedomain-System auch das Decawave-System zu testen. Letzteres ermöglicht eine wesentlich bessere Integration auch auf sehr kleinem Bauraum.

Der Einsatz eines Positioniersystems basiert meist auf dem Wunsch, Arbeitsabläufe zu überwachen. Überwachung ist hier nicht im klassischen Sinne gemeint: Auch für eine Automatisierung muss der derzeitige Arbeitszustand der Maschine überwacht werden; hierzu gehört ebenfalls die Position. Daher ergibt sich für jede Anwendung individuell eine maximal zulässige Fehlertoleranz. Bei derzeitigen Positioniersystemen, welche auf Funktechnologien basieren, sind Genauigkeiten von 20 cm bis 40 cm üblich. Ein Übertreffen dieser Genauigkeit wäre damit für das neue System wünschenswert.

4.5.2 Hardware

Die zu verwendenden UWB-Systeme bieten unterschiedliche Schnittstellen: Das P410 kann über eine USB- oder eine 3.3V-UART-Schnittstelle angesprochen werden. Das DWM1000 wird über eine SPI-Schnittstelle eingebunden. Über diese einseitigen Schnittstellen werden die UWB-Messungen durchgeführt und erfasst. Die Weiterverarbeitung dieser Daten und die Berechnung der Position wird dann in der Verarbeitungseinheit durchgeführt. Die Verarbeitungseinheit ist der Teil der Hardware mit welcher das UWB-System konfiguriert wird und Messungen anstößt. Hierfür sollte eine Plattform verwendet werden, welche gut verfügbar ist und die wichtigsten Standard-Kommunikationsschnittstellen bietet. Nach erfolgter Berechnung wird die Position dann über die anwendungsspezifische Schnittstelle ausgegeben. Um diese variablen Schnittstellen anbinden zu können, sind die anderen Schnittstellen (Ethernet, serielle Schnittstellen, o.ä.) notwendig. Über diese können fertige Zukaufmodule angesprochen werden, welche dann die Umsetzung auf die geforderte Schnittstelle übernehmen.

Für diese Verarbeitungseinheit ergeben sich die folgenden Anforderungen:

- leistungsfähiger Rechenkern (mind. 1 GHz und mind. 2 Kerne),
- mindestens 500 MB Arbeitsspeicher,
- 2 serielle Schnittstellen,
- 2 USB-Schnittstellen,
- 1 SPI-Schnittstelle,
- 1 Ethernet-Port und
- die Fähigkeit, ein Linux Betriebssystem inkl. Robot-Operating-System (ROS) zu betreiben.



Die letzte Anforderung folgt aus den Software-Anforderungen, welche im Kapitel 4.5.3 erläutert werden.

Alle Module erfordern, dass sie in der Applikation unter den Gegebenheiten installierbar sein müssen. Dies hat hauptsächlich Auswirkungen auf die Gehäusegröße und die Spannungsversorgung. Entsprechende Spannungsumsetzer müssen integriert werden, um die Hardware zu betreiben. Übliche in der Industrie vorhandene Versorgungen sind Gleichspannungsversorgungen bis 24 V und Wechselspannungen bis 230 V. Um die nötigen Spannungen (5V, 3.3V und 12V) zu generieren, wurde auf fertige Spannungswandlerprodukte zurückgegriffen.

Die Ankermodule müssen nicht zwingend über eine Verarbeitungseinheit verfügen. Bei dem P410-System kann das P410-Modul selbständig auf Anfragen antworten, ohne auf eine Verarbeitungseinheit angewiesen zu sein. Im Fall des DWM1000-Moduls ist zwingend eine Verarbeitungseinheit sowohl beim Tag-Modul als auch beim Anker-Modul notwendig.

Der strukturelle Aufbau der fertigen, auf dem P410-System basierenden, Module ist in Abbildung 4.13 abgebildet.

Um einen sinnvollen Einsatz im Schwermaschinenbau zu gewährleisten, ist eine entsprechende Einhausung unabdingbar. Da es sich um ein Funksystem handelt, muss diese Einhausung die benötigten Antennen berücksichtigen und entsprechend durchlässig für das relevante Signal sein. Eine externe Anbringung der Antenne wäre zwar denkbar, wurde jedoch hier aus Gründen der Robustheit nicht gewählt. Dies beeinträchtigt die Auswahl an Materialien, welche für das Gehäuse des Systems verwendet werden können. Metallische Materialien sind zumeist Funk-reflektierend, d.h. sie reflektieren die eintreffende Funkwelle nach dem Reflektionsgesetz. Diese Materialien besitzen nur eine geringe Funk-Durchlässigkeit, d.h. die eintreffende Energie wird fast vollständig wieder zurück reflektiert. Bestimmte Plastikwerkstoffe sind im Gegensatz dazu Funk-durchlässig. Diese Werkstoffe werden daher häufig für die Einhausung von Funksystemen verwendet. Diese Plastikwerkstoffe müssen jedoch gleichzeitig den mechanischen Beanspruchungen im Schwermaschinenbau widerstehen können. Die Recherche bestimmter Materialien und der Verfügbarkeit von Gehäusen, die aus den am besten geeigneten Materialien bestehen, ergab, dass Polyester-Gehäuse am zweckmäßigsten sind.

Des Weiteren ist im Schwermaschinenbau ein hoher Staub- und Wasserschutz nötig. Der Schutzgrad eines Gehäuses wird mit der Schutzart (IP code) spezifiziert. Für diese Schutzart existieren verschiedene Normen: DIN EN 60529:2014-09 [79], DIN 40 050-9:1993-05 [80] und die ISO 20653:2013 auf internationalem Level [81]. Alle

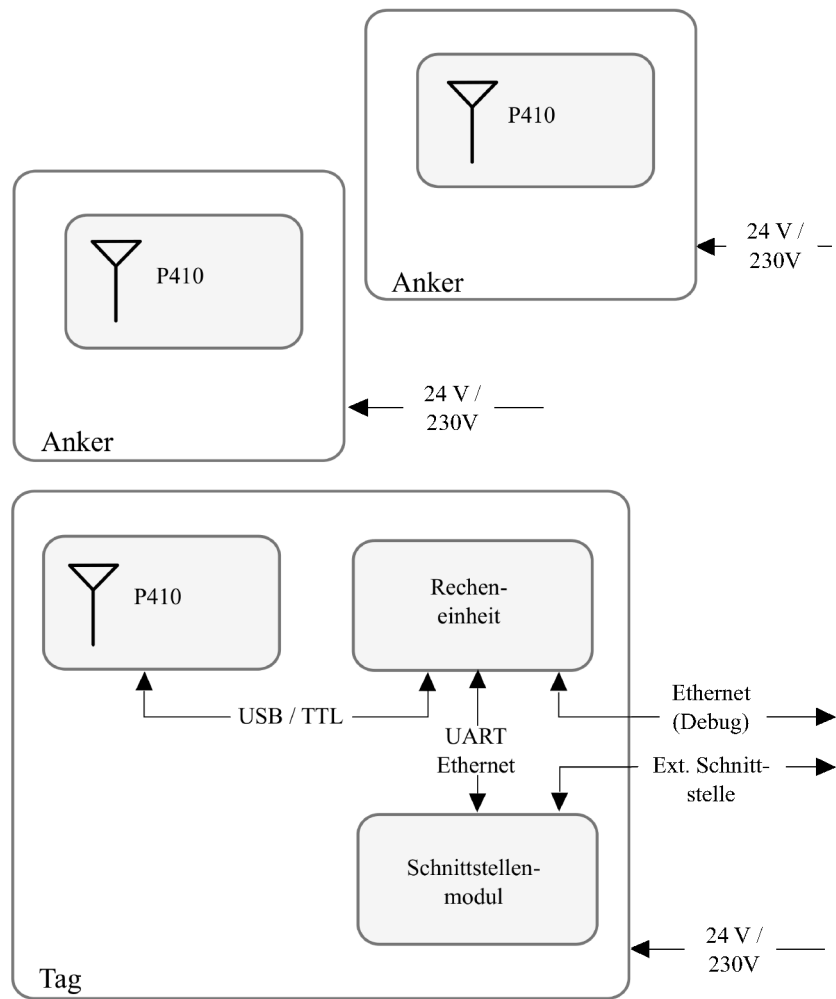


Abbildung 4.13: Strukturbild des Hardware-Aufbaus des Positioniersystems (Beispielhaft sind hier nur zwei Anker dargestellt).



1. Kennziffer	Schutz gegen Staub	Schutz gegen Berührung
0	kein Schutz	kein Schutz
1	Geschützt gegen feste Fremdkörper mit Durchmesser ab 50 mm	Geschützt gegen den Zugang mit dem Handrücken
2	Geschützt gegen feste Fremdkörper mit Durchmesser ab 12,5 mm	Geschützt gegen den Zugang mit einem Finger
3	Geschützt gegen feste Fremdkörper mit Durchmesser ab 2,5 mm	Geschützt gegen den Zugang mit einem Werkzeug
4	Geschützt gegen feste Fremdkörper mit Durchmesser ab 1,0 mm	Geschützt gegen den Zugang mit einem Draht
5	Geschützt gegen Staub in schädlicher Menge	vollständiger Schutz gegen Berührung
6	Staubdicht	vollständiger Schutz gegen Berührung

Tabelle 4.1: Bedeutung der ersten Kennziffer der IP-Schutzart (Nach DIN EN 60529).

Normen sind prinzipiell sehr ähnlich, unterscheiden sich allerdings in Details. Im Rahmen dieser Arbeit soll die Norm DIN EN 60529 Verwendung finden.

Die Schutzart unterscheidet drei Schutzkategorien:

- Schutz gegen Berührung,
- Schutz gegen Staub und
- Schutz gegen Wasser.

Die Kennzeichnung der Schutzart wird nach dem Muster *IPxx* gekennzeichnet. Die erste Ziffer gibt den Schutz gegen Berührung und Staub, die zweite Ziffer den Schutz gegen Wasser an. In den Tabellen 4.1 und 4.2 sind die Schutzarten aufgeschlüsselt.

Hinsichtlich der Schutzart gegen Staub ist die Mindestanforderung Klasse 6, da während des Betriebs mit hohem Staubaufkommen zu rechnen ist. Dadurch ist automatisch ein Schutz gegen Berührung gegeben. Hinsichtlich der Schutzart gegen Wasser wäre z.B. für den Einsatz im Tagebau Klasse 4 ausreichend, jedoch wird hier aus Gründen der Langlebigkeit oftmals eine höhere Klasse gefordert. Üblich sind hier Schutzarten ab Klasse 6 aufwärts. Es sollte jedoch in jedem Anwendungsfall speziell geprüft werden, inwiefern eine hohe geforderte Schutzart (z.B. ab Klasse 7 aufwärts) tatsächlich notwendig ist.

2. Kennziffer	Schutz gegen Wasser
0	kein Schutz
1	Schutz gegen Tropfwasser
2	Schutz gegen fallendes Tropfwasser, wenn das Gehäuse bis zu 15 Grad geneigt ist
3	Schutz gegen fallendes Sprühwasser bis 60 Grad gegen die Senkrechte
4	Schutz gegen allseitiges Spritzwasser
5	Schutz gegen Strahlwasser (Düse) aus beliebigem Winkel
6	Schutz gegen starkes Strahlwasser
7	Schutz gegen zeitweiliges Untertauchen
8	Schutz gegen dauerndes Untertauchen
9	Schutz gegen Wasser bei Hochdruck-/Dampfstrahlreinigung

Tabelle 4.2: Bedeutung der zweiten Kennziffer der IP-Schutzart (Nach DIN EN 60529).

4.5.3 Software

Die Verarbeitungseinheit muss verschiedene Aufgaben erfüllen, um die Positionsbestimmung durchzuführen. Die Kommunikation mit dem eingesetzten UWB-System ermöglicht das Durchführen von Entfernungsmessungen. Anschließend wird die Position berechnet. Je nach Anwendung müssen dann die relevanten Ausgabedaten aus der Position abgeleitet werden. Die Kommunikation mit der Ausgabeschnittstelle ermöglicht die Weitergabe der Daten an das Leitsystem der Anwendung. Die Software wurde streng modular aufgebaut. Die verschiedenen Teile der Software kommunizieren über definierte Schnittstellen miteinander, sodass jeder Teil gegen einen anderen funktionsgleichen Teil ausgetauscht werden kann. Beispielsweise kann so die Berechnung der Position durch eine andere Variante ausgetauscht werden, ohne dass die anderen Software-Module davon betroffen sind. Für diese Modularisierung sind verschiedene grundlegende Funktionseinheiten wie z.B. Inter-Prozess-Kommunikation, einheitliche Datenstrukturen und Datenaustauschformate, usw. nötig. Hierfür wurde die Software auf Basis des ROS aufgebaut. Dieses bietet entsprechende Möglichkeiten, Schnittstellen zu definieren und somit modulare Software zu entwickeln, ohne die dazu notwendigen grundlegenden Datenaustauschmechanismen händisch entwickeln zu müssen. Die Software ist im ROS in sogenannte Nodes unterteilt. Nodes kommunizieren über Messages: Diese stellen Nachrichten dar, welche unter einem sogenannten Topic veröffentlicht werden (Abbildung 4.14). Durch die Veröffentlichung von Topics stehen die Messages allen laufenden Nodes zur Verfügung. Der ROS-Master verwaltet alle Informationen über laufende Nodes und Topics. Eine Node, welche auf ein



bestimmtes Topic hören möchte, bezieht die nötigen Verbindungsinformationen über die Node, welche das Topic veröffentlicht, vom ROS-Master. Anschließend verbinden sich die Nodes direkt miteinander; die Messages werden dann über diese Verbindung direkt an die Listener-Node(s) gesendet. Die Nodes müssen nicht auf demselben Rechner laufen, sondern können im Netzwerk verteilt sein. Ein Rechner im Netzwerk stellt den Master dar, der alle organisatorischen Aufgaben übernimmt. Die tatsächliche Datenübertragung zwischen den Nodes läuft allerdings nicht zentralisiert über den Master, sondern direkt zwischen den Nodes.

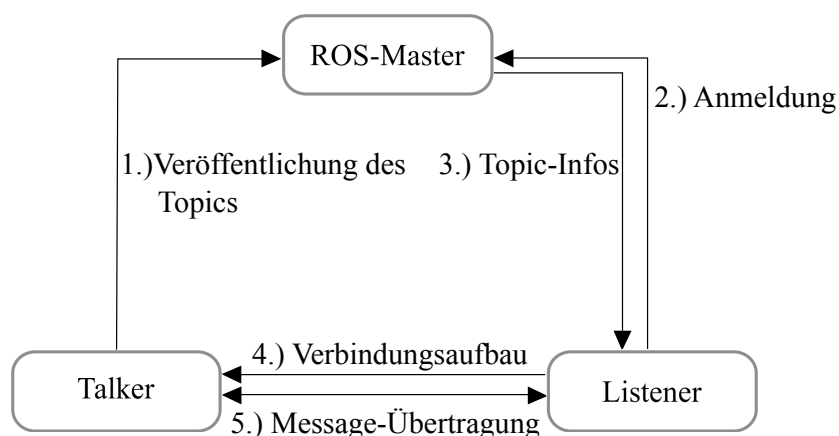


Abbildung 4.14: ROS-Architektur.

Die Struktur des ROS bietet die Möglichkeit, die Software so modularisiert aufzubauen, dass eine Weiterverwendung der Module sehr einfach umsetzbar ist. Die einzelnen Module beziehen die für sie relevanten Eingangsdaten von der entsprechenden Node über das entsprechende Topic ab, führen ihren Verarbeitungsschritt aus und geben das Ergebnis über ein neues Topic aus. Die Nodes sind alle unabhängig voneinander lauffähig.

In der Umsetzung des Positioniersystems wurde eine Modularisierung nach Aufgaben durchgeführt (siehe Abbildung 4.15). Eine Aufgabe ist z.B. die Kommunikation mit dem UWB-Modul und die damit verbundene Durchführung von Entfernungsmessungen. Die Node veröffentlicht die gemessenen Entfernungen in einem Topic, welches von der nachgeschalteten Filter-Node abonniert wird. In dieser Node finden Vorfilterungen, wie z.B. die 3-Sigma-Filterung statt (siehe Kap. 4.6). Basierend auf den gefilterten Entfernungen wird in der Laterationsnode anschließend die Position berechnet. Die Berechnung findet nach dem in Kap. 2.2 beschriebenen Verfahren statt. Wenn die Position bekannt ist, werden in der nachfolgenden Node die anwendungsspezifischen Parameter berechnet. Eine Abstraktion der Parameter von der Position

ist hilfreich, da oftmals nicht die Position an das Leitsystem gesendet werden muss, sondern von der Position abgeleitete Parameter (wie z.B. ein Verschiebeweg bzw. ein Winkel). Wenn die Parameter berechnet wurden, werden sie an die Schnittstellennode übergeben, welche sich um die Bedienung des Schnittstellenmoduls kümmert.

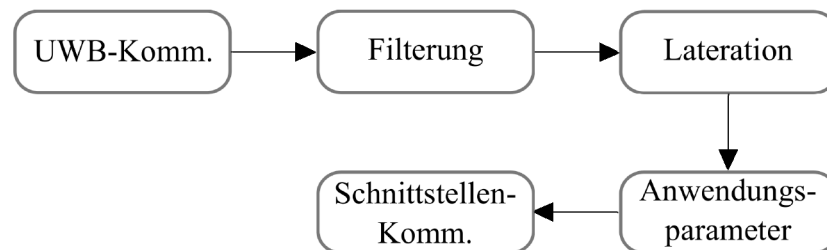


Abbildung 4.15: Node-Struktur für das entwickelte Positionsbestimmungssystem.

Die so erreichte Trennung von Aufgaben erlaubt es, Einheiten wie z.B. die Kommunikationseinheit für das UWB-Modul unabhängig von der jeweiligen Applikation einzusetzen. Ob eine 1D- oder 2D-Ortung durchgeführt wird, ist für Anwendungs-Node irrelevant. Die einzige Node, welche im Idealfall ausgetauscht werden muss, ist die Auswertungs-Node, welche entweder eine 1D-, 2D- oder 3D-Ortung berechnet.

4.6 Optimierung der Positionsbestimmung durch Filterung

Wie jedes reale System unterliegt auch das hier entwickelte Positioniersystem Fehlern. Diese Fehler sind in unterschiedliche Kategorien einzuordnen:

- systematische Fehler (z.B. durch ungenaue Kalibration) und
- stochastische Fehler (wie z.B. Rauschen).

Die Fehler können durch geeignete Verfahren auf unterschiedliche Weise minimiert bzw. vollständig beseitigt werden. Alle hier genannten Maßnahmen können ohne Einschränkung als Filter bezeichnet werden, daher soll diese Bezeichnung im Folgenden verwendet werden.

Die Beseitigung der systematischen Fehler erfordert die genaue Kenntnis der vorliegenden Situation (inklusive aller relevanten Randparameter) und setzt eine exakte Referenzmessung voraus. Zudem dürfen sich die Randparameter im laufenden Betrieb und während der Referenzmessung nicht unterscheiden, da sonst die Gültigkeit der Korrektur - ausgehend von der Referenzmessung - nicht mehr gegeben ist. Die



optimale Minimierung der stochastischen Fehler setzt die genaue Kenntnis des stochastischen Verhaltens der Fehlerquelle voraus. Es existieren verschiedene Verfahren, um den Einfluss von stochastischen Größen zu minimieren. Bekannte Verfahren sind z.B.:

- Mittelwertfilter,
- Medianfilter,
- Kálmán-Filter,
- Partikelfilter, etc.

Die Auswahl des am besten geeigneten Verfahrens hängt in hohem Maße von der Applikation und dem gewünschten Verhalten des Systems darin ab.

Zusätzlich zur Auswahl des Filters stellt sich die Frage, an welcher Stelle das Filter optimal eingebracht werden kann. Das hier beschriebene System basiert auf mehreren 1D-Messungen und berechnet aus diesen eine 1D/2D/3D-Position. Um Fehler im Signalfluss so früh wie möglich zu beseitigen, bietet es sich an, bereits die 1D-Messungen zu filtern. In diesem Fall wurden die folgenden Filter zur Verbesserung der 1D-Messungen implementiert:

- Mittelwertfilter und
- 3-Sigma-Filter.

4.6.1 Mittelwertfilter

Um stochastische Fehler in den Messungen zu minimieren, bietet sich ein (gleitender) Mittelwertfilter an. Basierend auf den N letzten Messungen wird der aktuelle, gefilterte Messwert berechnet:

$$\hat{d}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} d(t-i). \quad (4.3)$$

Hierdurch wird der Rauschanteil der Messungen erheblich reduziert. Der Nachteil dieser Methode ist, dass die Dynamik der Messung ebenfalls reduziert wird. Es ist daher darauf zu achten, dass N unter Berücksichtigung der Dynamik des zu messenden Systems sinnvoll gewählt wird.

4.6.2 3-Sigma-Filter

Dieser Filter wird verwendet, um Ausreißer in den Messdaten zu filtern. Der Filter basiert darauf, dass bei einem stochastischen Prozess die Messungen zu großen Teilen einen bestimmten Wertebereich nicht überschreiten. Für ein ideales Signal, welches mit weißem Rauschen überlagert wird, kann der Mittelwert μ und die Standardabweichung (σ) bestimmt werden. Die Wahrscheinlichkeit, dass die Messung im Bereich von $\mu \pm \sigma$ liegt, beträgt ca. 68,27%. Für den Bereich von $\mu \pm 3 \cdot \sigma$ (3-Sigma) beträgt die Auftrittswahrscheinlichkeit bereits 99,73% (Abbildung 4.16). Falls bei einer Messung nun ein Messwert auftritt, welcher außerhalb dieser 3-Sigma-Grenzen liegt, wird dieser Wert verworfen. Der Filter wird auch als outlier-filter bezeichnet.

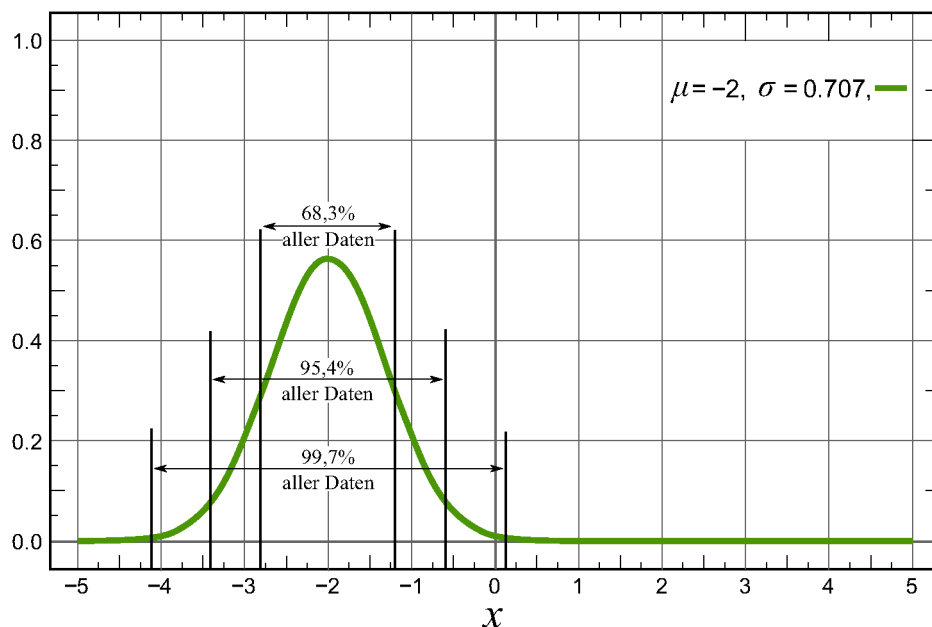


Abbildung 4.16: Wahrscheinlichkeitsdichte einer Normalverteilung. Der Mittelwert beträgt $\mu = -2$, die Standardabweichung $\sigma = 0,707$.

4.6.3 Kálmán-Filter

Der Kálmán-Filter stellt einen Zustandsschätzer dar, welcher auf der Basis von Messwerten versucht, auf den Zustand eines Systems zu schließen. Da dieser Filter sowohl das Rauschen der Messwerte als auch das (Bewegungs-)modell des zu beobachtenden Systems berücksichtigt, werden für den optimalen Einsatz dieses Filters Beschreibungen dieser Größen benötigt. Im Betrieb berechnet der Filter eine Schätzung der



Zustandsgröße für den aktuellen Zeitschritt (basierend auf den Zustandsgrößen des letzten Zeitschritts) und korrigiert diese Schätzung anschließend durch Berücksichtigung der tatsächlichen Messwerte. Die Gewichtung dieser beiden Anteile ist ein entscheidender Faktor bei diesem Filter und muss in jedem Anwendungsfall empirisch ermittelt werden.

4.6.4 Anwendung der Filterung

Die hier vorgestellten Filter finden in einigen Messungen der folgenden Kapitel Verwendung. Der Einsatz jeder einzelnen Filterart hängt, wie schon beschrieben, stark von der einzelnen Anwendung ab. Allerdings lässt sich generell sagen, dass eine mittelwertfilterung der Entfernungsmessungen einen erheblichen Einfluss auf die Genauigkeit hat. Da mit den hier verwendeten UWB-Systemen eine sehr hohe Messrate zu erzielen ist (im Bereich von mehr als 10 Hz) kann das System selbst für dynamische Szenen und mit Mittelwertfilterung noch eingesetzt werden. Die Outlier-Detection mittels 3-Sigma-Filter erwies sich ebenfalls als wichtiges Standard-Filter, welches bei fast jeder Anwendung zum Einsatz kommen sollte.

5 Funktionsprüfungen und Testmessungen

Um die Eignung des entwickelten Positioniersystems zu bewerten, wurden mehrere Testmessungen unter verschiedenen Bedingungen durchgeführt. Je nach Messung befand sich das System in unterschiedlich fortgeschrittenen Stadien der Entwicklung und Integration. Die ersten beiden Messungen wurden lediglich mit dem P410-System durchgeführt, da nur dieses zur Zeit der Messung verfügbar war. Bei der dritten Messung war sowohl das P410-System als auch drei EVB1000-Module verfügbar, weshalb diese Messung mit beiden Systemen durchgeführt wurde.

5.1 1D Labormessung P410

In einem ersten Versuch wurde die Genauigkeit der Entfernungsmessung des P410-Moduls in einer Laborumgebung getestet. Die Umgebung des Labors bestand aus einem ca. $20\text{ m} \times 10\text{ m} \times 10\text{ m}$ großen Raum, in welchem Tische, Werkbänke und Maschinenprüfstände aufgestellt waren. Die Maschinen waren zur Zeit der Messung ausgeschaltet. Dazu wurden zwei der Module in einer Entfernung von $10,315\text{ m}$ aufgestellt. Anschließend wurden 100 Entfernungsmessungen aufgezeichnet und ausgewertet. Dabei wurde das System vorher bei dieser Entfernung kalibriert. Maßgeblichen Einfluss auf die Performance des Positioniersystems haben die Genauigkeit und die Wiederholgenauigkeit. Um diese Faktoren bewerten zu können, wurden die Messungen hinsichtlich Mittelwert und Standardabweichung untersucht (Abbildung 5.1).

Laut Datenblatt soll das System eine Genauigkeit (Mittelwertabweichung) von $2,1\text{ cm}$ und eine Präzision (Wiederholgenauigkeit) von $2,3\text{ cm}$ aufweisen [82]. In dieser Labormessung betrug der gemessene Mittelwert $10,3189\text{ m}$, was einer Abweichung vom tatsächlichen Wert um $3,9\text{ mm}$ entspricht. Die Wiederholgenauigkeit wurde mit $7,5\text{ mm}$ gemessen. Damit konnten die Werte des Systems aus dem Datenblatt (unter Laborbedingungen und an diesem ausgewählten Messpunkt) bestätigt werden.



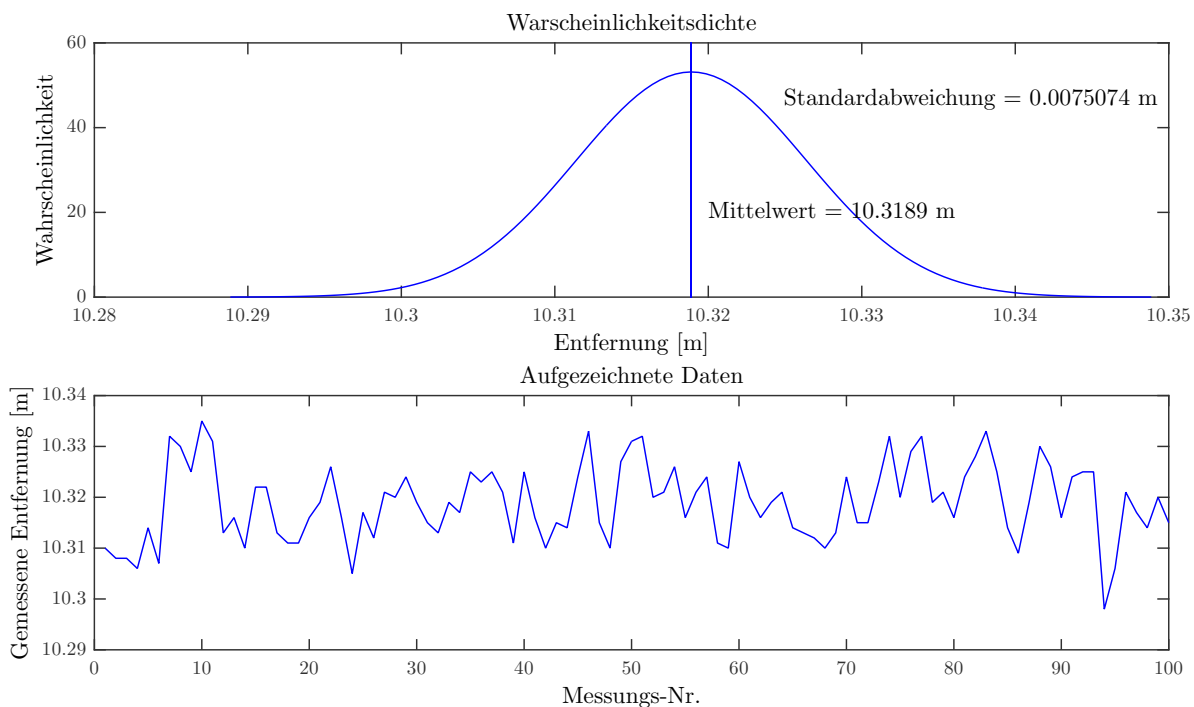


Abbildung 5.1: 1D-Labormessung mit dem P410-Modul.

5.2 3D Statische & dynamische Labormessungen P410

Um die Genauigkeit der Ortung im dreidimensionalen Raum bewerten zu können, wurde in einer Zusammenarbeit mit dem FlandersMake⁽ⁱ⁾ und dem LCM⁽ⁱⁱ⁾ eine Messkampagne durchgeführt. Teil dieser Messkampagne war das auf dem P410 basierende Positioniersystem. Der Aufbau fand zwar in einer Art Laborumgebung statt, jedoch war die Multipfadbelastung in der Umgebung sehr groß, da das Volumen des Raums relativ gering war und Decke, Wände und Boden aus glatten, Funk-reflektierenden Materialien bestanden. Die Umgebung war daher sehr gut geeignet, um die Robustheit der UWB-Technologie bezüglich Multipfadausbreitung zu evaluieren. Getestet wurden zwei Anwendungsfälle:

- statische 3D-Ortung auf zwei verschiedenen Höhen und
- dynamische 3D-Ortung auf einem Linearschlitten.

In beiden Anwendungsfällen wurde das System in einer Entfernung von 10 m kalibriert. Der Aufbau für die dynamischen Messungen erfolgte an einem Forschungsaufbau des FlandersMake, einem Badminton-Roboter, welcher über einen Linearschlitten in einer Richtung verfahrbar war.

Tagposition	Kenngröße		X	Y	Z
Niedrig	Genauigkeit	Durchschn.	3,26	1,18	8,25
		Max.	7,15	2,79	13,76
	Std.-Abw.	Durchschn.	2,77	1,18	7,01
		Max.	5,04	2,12	9,27
Hoch	Genauigkeit	Durchschn.	1,77	1,53	5,73
		Max.	4,73	3,17	13,73
	Std.-Abw.	Durchschn.	1,87	0,78	4,66
		Max.	2,84	1,19	7,33

Tabelle 5.1: Abweichung (in cm) der ermittelten 3D-Position gegenüber der Referenzpositionen.

Der Aufbau der stationären 3D-Ortung ist in Abbildung 5.2 dargestellt. Die Anker der UWB-Systeme wurden auf Stativen befestigt und auf unterschiedliche Höhen eingestellt: Zwei Anker (diagonal versetzt) wurden auf eine Höhe von ca. 1 m eingestellt, die anderen beiden Anker auf ca. 3 m (Abbildung 5.2). Der Tag wurde ebenfalls auf einem höhenverstellbaren Stativ befestigt und während der Messungen auf vorher definierte Positionen gestellt. Auf jeder Position wurden 200 Messungen durchgeführt, was für jede Position ca. 20 Sekunden dauerte. Anschließend wurde die Höhe des Tags von 0,7 m auf 1,5 m erhöht und die Messungen wiederholt. Um eine Referenzposition der Anker zu erhalten, wurde mit einem Faro-3D-Laserscanner vor jeder Messung ein 3D-Scan des Messfelds erstellt. Durch die nachträgliche Auswertung dieser 3D-Aufnahme konnten die Positionen der Anker und des Tags relativ zueinander bestimmt werden. Die Auswertung der Positionsbestimmung ist in Abbildung 5.3 dargestellt. Für jede Position wurde die ermittelte Position mit der jeweiligen Referenzposition verglichen. Tabelle 5.1 stellt die ermittelten Genauigkeiten und Präzisionen dar. Die Zeilen beinhalten zum einen die über alle Positionen gemittelten Werte (*Durchschn.*), als auch den maximal aufgetretenen Wert (*Max.*). Die Kenngrößen wurden für jede Dimension einzeln aufgeschlüsselt angegeben. Die Abweichungen in z-Richtung sind am größten. Dies ist zu erwarten, da die Apertur der Anker in z-Richtung die geringste Ausdehnung aufweist. Analog sind die Abweichungen in y-Richtungen am geringsten.

Die dynamischen Messungen sollten zeigen, wie gut das Positioniersystem mit schnellen Bewegungen zurecht kommt. Der Tag wurde dazu auf einem Linearschlitten montiert (Abbildung 5.4). Die Anker wurden um diese herum aufgestellt - ähnlich



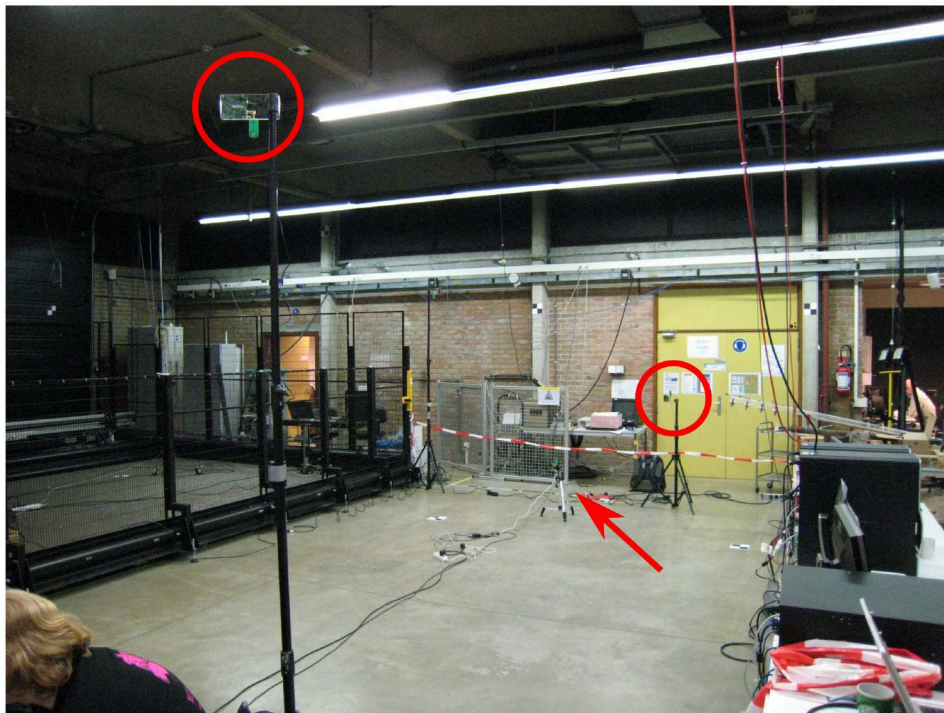


Abbildung 5.2: Aufnahme der stationären (Labor-)Messung zur 3D-Ortung. Zwei der Anker sind in rot eingekreist, der Pfeil zeigt den Tag (auf niedriger Höhe). Decke, Boden und Wände bestehen aus hoch reflektierenden Materialien.

den stationären Messungen. Der Tag wurde per USB an den Messrechner angeschlossen. Der Linearschlitten wurde durch ein Matlab-Skript angesteuert und verfügte weiterhin über einen Encoder, welcher als Referenz diente. Für die Tests wurde der Linearschlitten mit Geschwindigkeiten von 0,1 m/s bis 6 m/s mehrfach hin- und her verfahren. Das Ergebnis für 6,0 m/s ist in Abbildung 5.5 dargestellt. Da der Linearschlitten nur in einer Dimension verfahren wurde, ist nur diese Dimension dargestellt. Da zur Positionsbestimmung mehrere Entfernungsmessungen notwendig sind (vier in diesem Fall) und diese sequentiell stattfinden, passen die einzelnen Messungen nicht mehr perfekt zu einer Position. Dadurch macht dieser Test eine Aussage bezüglich der Robustheit des Laterations-Algorithmus.

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Genauigkeit im stationären Fall den Anforderungen entspricht. Die Abweichungen in x- und y-Richtung liegen unter 5 cm, die Abweichung in z-Richtung unter 15 cm. Eine Vergrößerung der Apertur in z-Richtung kann die Genauigkeit in dieser Richtung erhöhen, sodass sie auf das Niveau der x- & y-Richtung gehoben werden kann. Im Vergleich zur 1D-Labormessung zeigt sich, dass die Genauigkeit etwas schlechter geworden ist. Dies liegt unter anderem daran, dass die 3D-Genauigkeit aufgrund der Fehlerfortpflanzung naturgemäß schlechter ist als

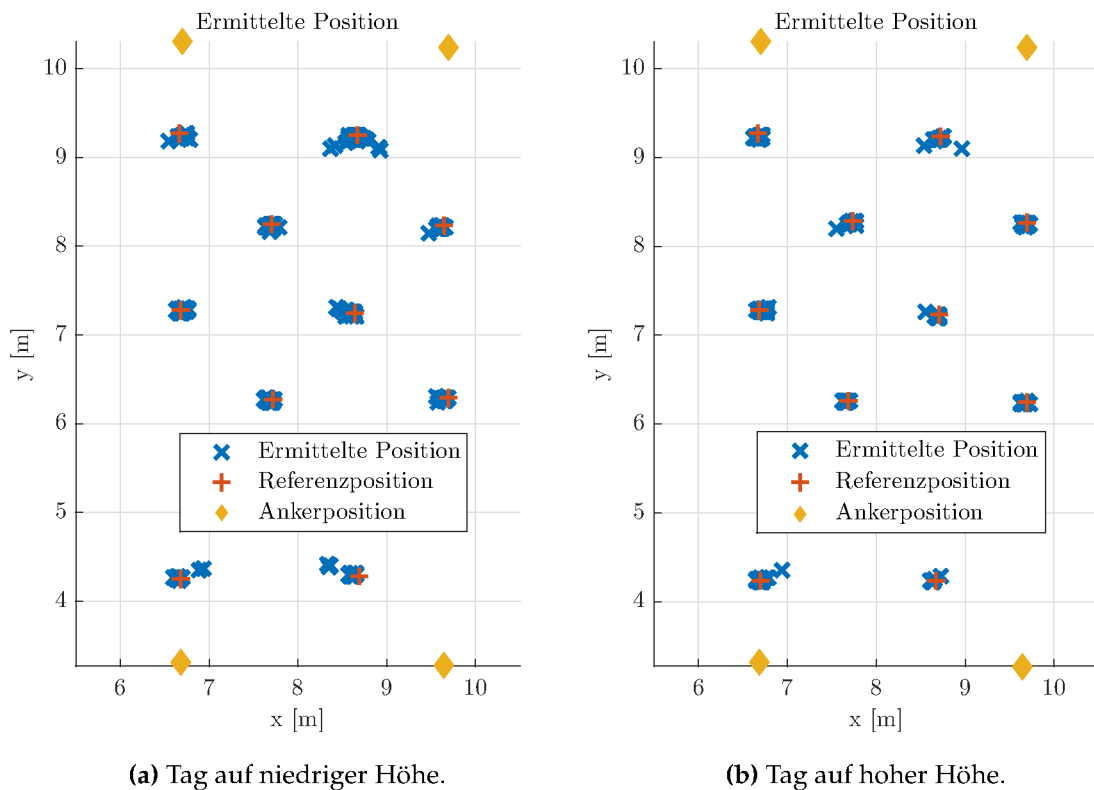


Abbildung 5.3: Ergebnis der 3D-(Labor-)Positionsbestimmung mit dem P410-System.

die 1D-Genauigkeit. Zudem zeigt sich der Einfluss der multipfadlastigen Umgebung, welche ebenfalls zu einer Verschlechterung führt. Die Anteile, zu welchen die beiden genannten Fehlerquellen zur Gesamtverschlechterung beitragen, konnten in dieser Messung nicht exakt bestimmt werden.

Auch der dynamische Test hat positive Ergebnisse erzielt. Selbst bei hohen Geschwindigkeiten kann das System gute Genauigkeiten erzielen. Der Einsatz des Systems in dynamischen Anwendungen erscheint damit sinnvoll.



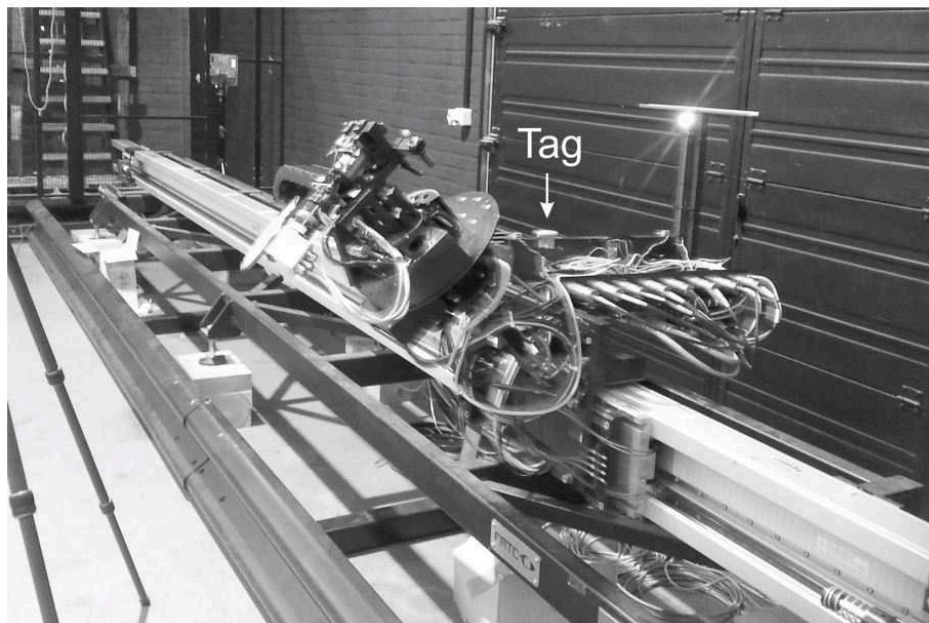


Abbildung 5.4: Aufbau der dynamischen 1D-Labormessung am Forschungsaufbau des FlandersMake, einem Badminton-Roboter.

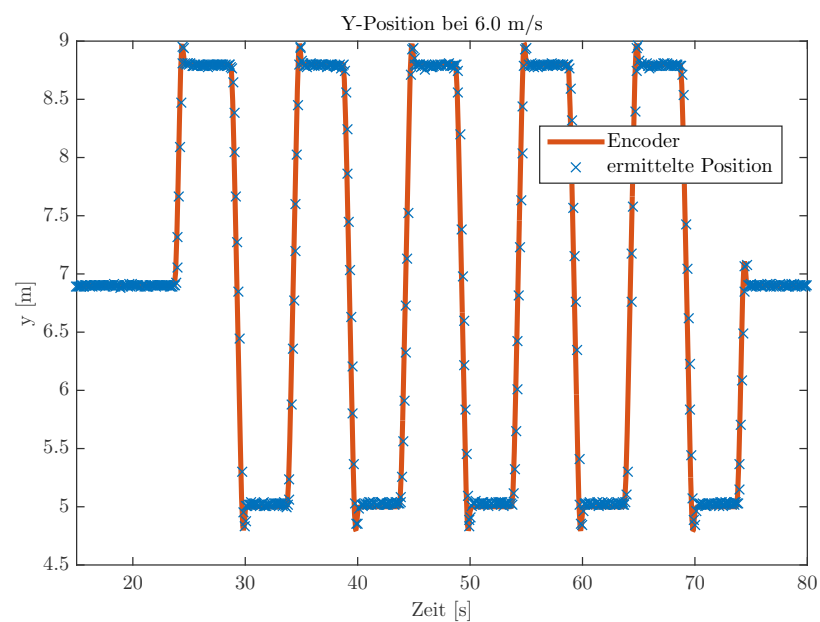


Abbildung 5.5: Ergebnis der dynamischen 3D-(Labor-)Messung bei 6,0 m/s.

5.3 Freifeldmessungen P410 und EVB1000

Um die Genauigkeit beider UWB-Systeme im Freifeld zu testen, wurde eine Messkampagne auf einer Teststrecke für Kraftfahrzeuge durchgeführt. Die Strecke war asphaltiert, ca. 50 m breit und auf beiden Seiten von Bäumen begrenzt. Getestet wurde die Genauigkeit der Entfernungsmessung des Systems. Drei Module je UWB-System fanden in der Messung Verwendung: Der Anker führte sequentiell Messungen zu zwei Tags aus. Die Tags waren auf einem Metallprofil befestigt. Für das Decawave-System wurde auf drei EVB1000-Boards zurückgegriffen. Durch die Verwendung von zwei Tags sollte getestet werden, ob die Messergebnisse sich von Modul zu Modul unterscheiden.

Die Tags wurden auf einen Aluminiumträger befestigt und auf der Teststrecke in definierten Intervallen vom Basismodul entfernt. Die Intervalle wurden wie folgt festgelegt:

- 10 m-30 m: 1 m-Intervalle,
- 30 m-100 m: 2 m-Intervalle,
- 100 m-212 m: 5 m-Intervalle und
- ab 212 m: 10 m-Intervalle.

Zur Referenzmessung wurde ein elektronisches Tachymeter verwendet. Mit dieser wurden für jeden Messpunkt die Entfernungen zwischen dem Basismodul und den beiden Mobilmodulen gemessen. Die verwendete Totalstation wies eine Genauigkeit von ca. ± 1 cm auf. An jedem Messpunkt wurden 500 Entfernungsmessungen zu jedem Mobilmodul durchgeführt. Diese Messungen wurden gemittelt und von der Referenzdistanz subtrahiert, um den Fehler zu ermitteln (Abbildung 5.6).

Das Decawave-System funktionierte ab einer Entfernung von 230 m nicht mehr zuverlässig, daher kann nur für Entfernungen bis dahin eine Aussage über den Fehler gemacht werden. Das P410 funktionierte bis zur maximalen Länge der Teststrecke von 360 m. Durch eine nachträgliche Analyse zeigte sich, dass die geringe Reichweite des Decawave-Systems an dessen eingestellter Sendeleistung lag.

Beide P410-Module folgen dem prinzipiell gleichen Verlauf. Zu Beginn ist der Fehler im sehr guten Bereich von wenigen Zentimetern. Bei ca. 50 m steigt der Fehler auf mehr als 5 cm an. Dies ist durch den Eintritt in die erste Fresnel-Zone zu erklären: Auch bei direkter Sichtverbindung zwischen zwei Funksystemen, treten Interferenzen auf. Diese sind durch die Entfernung zwischen den Systemen, die Bandbreite des Funksystems und der Bebauung des Umfelds bestimmt. Die Fresnel-Zonen (benannt nach Augustin Jean Fresnel) geben Rotationsellipsoide an, in welchen konstruktive



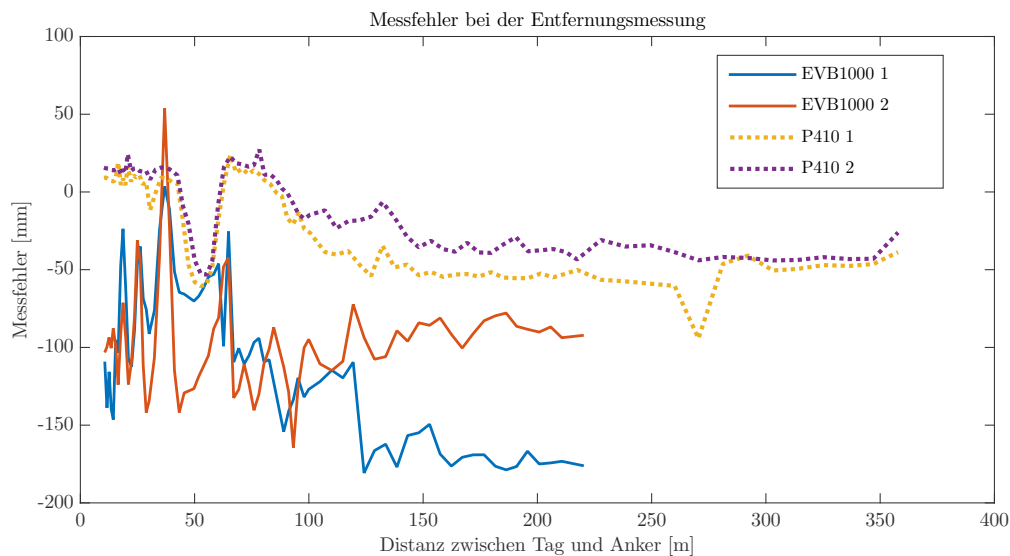


Abbildung 5.6: Fehler der Entfernungsmessung im Freifeld (Timedomain und Deca-wave).

bzw. destruktive Interferenzen auftreten. Im Freifeld auf einer ebenen Fläche ergibt sich für die verwendeten Bandbreiten eine destruktive Interferenz bei einer Entfernung zwischen Tag und Anker von ca. 50 m. Nach Austritt aus dieser Zone verringert sich der Fehler wieder auf das Niveau vor Eintritt in die Zone. Im weiteren Verlauf ist eine stetige Zunahme des Fehlers auf ca. 4 cm bis 5 cm zu verzeichnen. Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass die Teststrecke nicht ideal ist und auftretende Interferenzen durch Objekte neben der Strecke einen Genauigkeitsverlust über größere Entfernungen hin bedingen. Im Bereich zwischen 50 m bis 100 m befand sich ein Metallcontainer und verschiedene andere metallische Objekte. Diese Erklärung wäre insofern plausibel, als dass der Messfehler ab 140 m als konstant angenommen werden kann. Der Ausreißer des P410-Moduls 1 bei 260 m könnte ebenfalls mit Objekten entlang der Teststrecke begründet werden. Jedoch stellt sich die Frage, warum diese keinen Einfluss auf das P410-Modul 2 hatten.

Insgesamt ergibt sich für das P410-System ein durchschnittlicher Fehler von ca. 4 cm. Beide verwendeten Module weisen (bis auf einzelne Ausreißer) einen ähnlichen Verlauf auf, sodass sich bestätigen lässt, dass der Messfehler nicht maßgeblich vom verwendeten Modul abhängt. Dies bedeutet, dass eine Modul-spezifische Kalibration nicht notwendig ist.

Für das Decawave-System ergibt sich ein wesentlich unstetigerer Messfehler. Allgemein lässt sich schon bei geringeren Distanzen ein wesentlich höherer Messfehler

verzeichnen (bis zu 15 cm). Auch hier tritt der Effekt der ersten Fresnel-Zone klar zutage - allerdings bei ca. 35 m. Die unterschiedliche Position der Fresnel-Zone ist durch das unterschiedliche Frequenzband, die die Systeme verwenden, und die unterschiedliche Abstrahlcharakteristik der Antennen zu erklären. Nach dieser Zone geht der Fehler für ein Modul wieder auf den vorherigen Wert zurück, für das andere Modul jedoch nicht. Dieses Verhalten setzt sich im folgenden Verlauf fort: Beide Decawave-Module zeigen einen gänzlich anderen Messfehlerverlauf auch bei größeren Distanzen.

Die Ergebnisse für das Decawave-System zeigen eine klare Abhängigkeit des Messfehlers vom Modul. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit der Modul-spezifischen Kalibration. Weiterhin ist der Messfehler des Systems auf einem höheren Niveau als beim P410-System.

Mit diese Messungen sollte evaluiert werden, wie sich die UWB-Systeme bei größeren Entfernungen verhalten. Da im industriellen Einsatz häufig Entfernungen von mehr als 100 m auftreten, ist das Verhalten der 1D-Messgenauigkeit über diese großen Bereiche von besonderem Interesse. Es zeigt sich, dass das P410-System grundsätzlich besser geeignet scheint, um eine relativ konstante Genauigkeit auch über größere Entfernungsbereiche zu liefern. Die erreichte Genauigkeit von 4 cm bis 5 cm ohne Einsatz von zusätzlichen Verarbeitungsschritten entspricht den Anforderungen. Dieses System stellt damit eine sinnvolle Basis für das zu entwickelnde Positionsbestimmungssystem dar. Die Ungenauigkeiten des Decawave-Systems sollen im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter ergründet und erklärt werden. Es ist jedoch zu erwarten, dass durch genaue Analyse der Algorithmik und Verbesserung der Entfernungsmessung eine Steigerung der erreichbaren Genauigkeit zu erzielen ist.



6 Fallstudien zur Implementierung im Schwermaschinenbau

In diesem Kapitel werden vom Autor und der Arbeitsgruppe *Sensorik und Automation* am Institut für Maschinentechnik der Rohstoffindustrie durchgeführte Installationen und Messungen des entwickelten UWB-Positioniersystems vorgestellt. Jede Applikation stellt eine individuelle Herausforderungen dar. Somit kann die Leistung des Systems in unterschiedlichen Anwendungen evaluiert werden und Schlüsse auf die Machbarkeit und Nutzbarkeit des Systems für ähnliche Anwendungen gezogen werden. Hauptsächlich wurde zur Realisierung das P410-System verwendet, da dessen Entwicklungsstand weiter fortgeschritten war. Falls das Decawave-System verwendet wurde, wird dies explizit im Unterkapitel erwähnt.

6.1 Positionsbestimmung eines Schaufelradbaggers am Kohlenmischplatz

6.1.1 Ziel der Messung

Ziel der ersten Applikation war eine 1D-Ortung im Außeneinsatz. Das Betriebsmittel, welches positioniert werden soll, war ein Schaufelradbagger am Kohlenmischplatz. Die Kohle aus dem Tagebau wird über Förderbänder zu diesem Platz transportiert. Ein Absetzer nimmt die Kohle vom Förderband auf und verkippt sie in festgelegten Abschnitten auf dem Kohlenmischplatz. Von dort wird die Kohle wiederum durch einen Schaufelradbagger - im Englischen „Reclaimer“ genannt - aufgenommen und auf ein weiteres Förderband gegeben, welches die Kohle ihrem Bestimmungsort zuführt. Dieser Bestimmungsort ist meist eine Zugverladung oder ein Kraftwerksbunker. Wenn eine Analyse der aus dem Tagebau geförderten Kohle vorliegt, können unterschiedliche Kohlequalitäten in festgelegten Abschnitten auf dem Kohlenmischplatz verkippt werden. Durch diese Separierung kann der Schaufelradbagger bei der erneuten Aufnahme wiederum eine Kohlenmischung durchführen, und damit



eine vorgegebene Kohlenqualität sicherstellen. Um dies technisch zu ermöglichen, ist eine Positionsbestimmung von Absetzer und Bagger notwendig. Eine Herausforderung bei dieser Anwendung ist, dass die Strecken, auf welchem Absetzer oder Bagger fahren, relativ lang sind (üblicherweise 1 Km) und trotzdem eine relativ hohe Genauigkeit für die Ortung gefordert ist (im cm-Bereich). In dieser Applikation war das Aufnahmegerät ein Schaufelradbagger. Es existieren auch andere Aufnahmegeräte, die Kohle aus einem definierten Bereich aufnehmen, für diese Geräte kann der Messaufbau mit kleinen Variationen ebenso verwendet werden.

6.1.2 Messaufbau

Der Aufbau bestand aus drei UWB-Modulen: zwei Module als Anker auf dem Boden entlang der Strecke und ein Modul als Tag am Bagger. Durch Entfernungsmessung zwischen dem Baggermodul und den beiden Bodenmodulen kann dann eine Positionsbestimmung des Baggers entlang der Strecke erreicht werden. Abbildung 6.1 zeigt den Messaufbau.

Erste Kalibrationsmessungen hatten gezeigt, dass sich das Aufstellen der Module direkt auf dem Boden negativ auf die Reichweite des Systems auswirkt, was durch die Fresnel-Zone zu erklären ist (siehe Kapitel 5.3). Daher wurden die Ankermodule auf Stative gestellt. Die Anbringung der Anker und des Tags sind in Abbildung 6.2b bzw. Abbildung 6.2a dargestellt. Die Entfernung zwischen den beiden Bodenmodulen wurde mittels Trägernummern am Fördergurt ermittelt. Die Anker standen bei den Fördergurt-Träger-Nummern 203 bzw. 123. Dies entsprach einer Distanz zwischen den Ankermodulen von ca. 400 m. Auf eine genaue Einmessung der Position der UWB-Module musste bei dieser Messung leider verzichtet werden.

Der Messrechner wurde auf dem Bagger aufgebaut und per Kabel mit dem Tag verbunden. Auf diesem Rechner erfolgte die Aufzeichnung der Rohdaten, die Nachverarbeitung und die Visualisierung der Messdaten. Für die Auswertung werden die exakten Abstände der Anker voneinander sowie der Höhenunterschied zwischen Ankern und Tag benötigt. Diese Informationen wurden per Laserdistanzmesser von Hand ermittelt.

Für die Messungen wurden Gehäuse verwendet, die speziell für Testmessungen entwickelt wurden. Die Hauptaufgabe derer besteht darin, die Module vor Schäden und Witterungseinflüssen zu schützen. Daher wurden Gehäuse mit IP65 Klassifizierung verwendet. Zum einfacheren Umgang wurden die Gehäuse mit Schnittstellen für USB und einer externen Spannungsversorgung ausgestattet. Zudem befinden sich im



Abbildung 6.1: Messaufbau der 1D-Messung am Kohlenmischplatz.

Inneren sechs C-Batterien, sodass die Module während der Testmessung unabhängig von jeglicher Infrastruktur sind. Die Tatsache, dass sich die Antennen innerhalb der Gehäuse befinden, wirkt sich nicht negativ aus, weil das Material (Polycarbonat) eine hohe Transmissivität aufweist und die Kommunikation zwischen den Modulen dadurch nicht beeinflusst.

6.1.3 Durchführung

Bei der Messung wurden mehrere Züge des Baggers durchgeführt. Währenddessen wurden die Daten des UWB-Systems aufgezeichnet und die Ortung durchgeführt. Während eines Zugs fuhr der Bagger von seiner Startposition aus 200 m in eine Richtung, kehrte dann um und fuhr zu seiner Startposition zurück.





(a) Anbringung des Mobilmoduls am Bag- (b) Aufstellung des Ankermoduls.
ger.

Abbildung 6.2: Anbringung der UWB-Module für die 1D-Kohlenmischplatzmessung.

6.1.4 Ergebnisse

Von den verschiedenen Zügen, die aufgezeichnet wurden, wird hier beispielhaft nur einer vorgestellt. Die Messdaten aller Züge waren hinsichtlich ihrer Aussage identisch. Bei der Messung konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, die Position des Baggers am Kohlenmischplatz mithilfe der UWB-Technologie zu bestimmen. Die Messergebnisse wurden dabei in Echtzeit auf dem Messrechner mit Verbindung zum Baggermodul visualisiert. In Abbildung 6.3 ist diese Visualisierung zu sehen. Die Position des Baggermoduls wird relativ zum ersten Bodenmodul berechnet. Zu Beginn des abgebildeten Zeitraums befindet sich der Bagger 177,97 m vom ersten Bodenmodul entfernt. Die Rohdaten während der Messung wurden mitgeloggt und können so jederzeit als Grundlage für den Test von verbesserten Algorithmen verwendet werden. Abbildung 6.3 zeigt den Zeitraum von einem Baggerzug. Man sieht den linearen Verlauf der Position über die Zeit während der Bagger fährt.

Weil sich der Bagger während des Betriebs auf einer Strecke von bis zu 1 km bewegen kann und die Module mit den verwendeten Antennen eine Reichweite von ca. 400 m haben, ist es erforderlich, für die Ortung des Baggers auf der kompletten Strecke mehr als zwei Module zu verwenden. Dabei ist es notwendig einen *Handover* zwischen den Modulen durchzuführen, weil das Baggermodul nicht immer die Entfernung

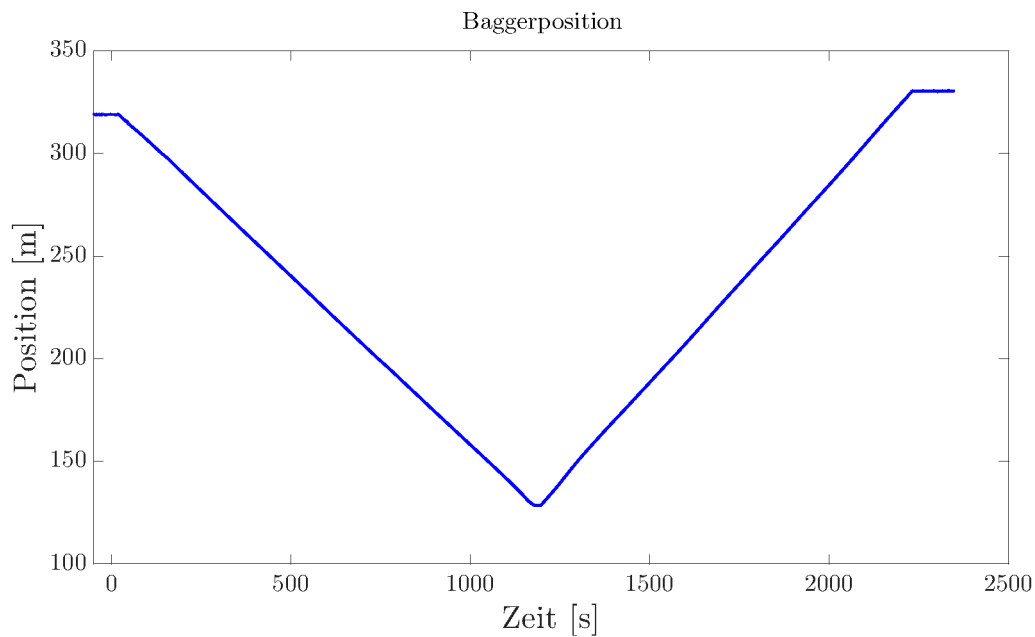


Abbildung 6.3: Auswertung der Baggerposition über die Zeit.

zu allen Bodenmodulen messen kann. Im Rahmen der Testmessung wurde dieser *Handover* zwischen den Modulen erfolgreich getestet und es wurde gezeigt, dass es möglich ist, die Position des Baggermoduls anhand von mehreren Bodenmodulen zu bestimmen.

Die Genauigkeit der bestimmten Positionen konnte in den Testmessungen nur relativ zu den Bodenmodulen berechnet werden, weil die genauen Positionen der Bodenmodule auf der Strecke nicht bekannt waren. Eine exakte Einmessung der Bodenstationen würde die Berechnung einer absoluten Position erlauben. Beim Stillstand des Baggers wurden leichte Schwankungen der Messung beobachtet (Abbildung 6.4). Die Ungenauigkeiten betragen ca. ± 2 cm. Dies ist vor allem dem Fehlen von spezialisierten Signalverarbeitungsschritten geschuldet. Durch den Einsatz von beispielsweise einem gleitenden Mittelwertfilter können diese Ungenauigkeiten weitgehend kompensiert werden.



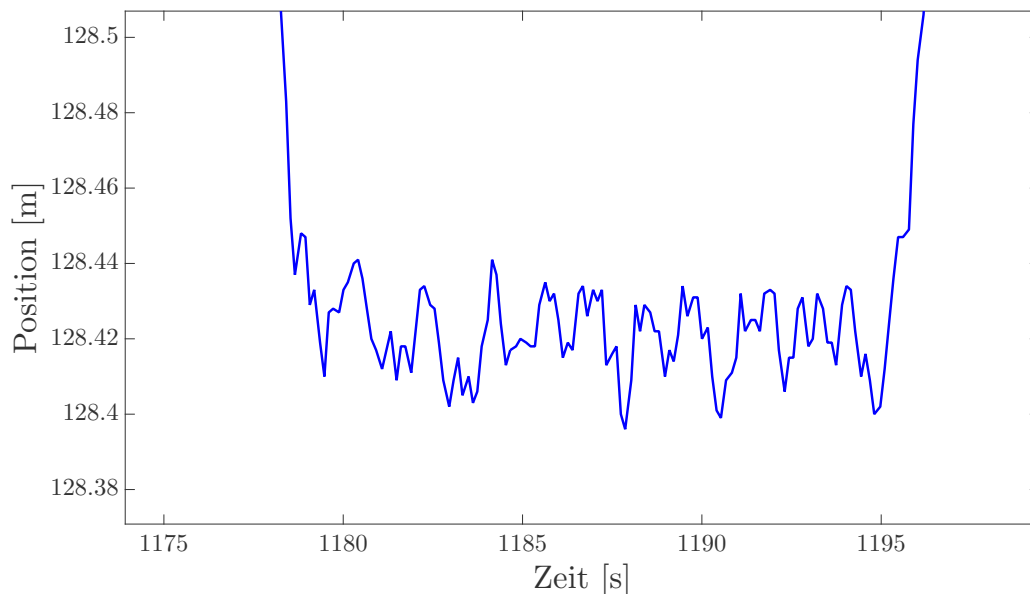


Abbildung 6.4: Messrauschen beim Stillstand des Baggers am Kohlenmischplatz.

6.2 Positionsbestimmung eines Bunkerentladewagens im Kohlenbunker

6.2.1 Ziel der Messung

Ziel dieser Messung war die Ortung (Wegmessung) eines Bunkerentladewagens im Kohlenbunker. Die speziellen Herausforderungen bei dieser Anwendung ergeben sich aus dem Aufbau eines solchen Kohlenbunkers. Der Bunker stellt einen Puffer für die Kohlenversorgung eines Kraftwerks dar. Die aus dem Tagebau geförderte Kohle wird hier zwischengelagert. Die Entnahme der Kohle erfolgte in dieser Anwendung über spezielle Bunkerentladewägen. Diese Entladewägen fahren auf Triebstöcken in einen Tunnel in den Bunker ein und kratzen die Kohle über Flügelkratzer aus dem Bunker (Abbildung 6.5). Dieser Tunnel ist sehr schmal ausgelegt, sodass der Querschnitt nicht viel größer ist als für die Wägen nötig. Hierdurch ergeben sich erhebliche Probleme bezüglich der Multipfadausbreitung, wodurch normale Funksysteme nicht sinnvoll einsetzbar sind. Weiterhin kommt es regelmäßig zu Betriebsfällen, in denen die von oben in den Bunker zugeführte Kohle direkt bis unten durchrutscht und dadurch eine erhebliche Staubbelastungen nach sich zieht. Mit dieser Messung sollte eine Alternative zum bisher installierten Lasermesssystem evaluiert werden, da dieses regelmäßig durch die Staubbelastung ausfiel.

6.2.2 Messaufbau

Der strukturelle Aufbau der Testmessung ist in Abbildung 6.5 dargestellt. Zur Messung wurde die mittlere der drei Strecken verwendet. Am Ende des Parkbereichs dieser Strecke wurde das Ankermodul installiert; auf dem Bunkerentladewagen ein Tagmodul. Beide wurden mit einer 24 V-Spannungsversorgung betrieben. Weiterhin wurde darauf geachtet, dass eine Sichtverbindung zwischen den beiden Modulen bestand. Der Bunkerbereich war ca. 22 m lang, der Parkbereich ca. 10 m lang, womit sich eine zu überwachende Gesamtlänge von ca. 32 m ergab.

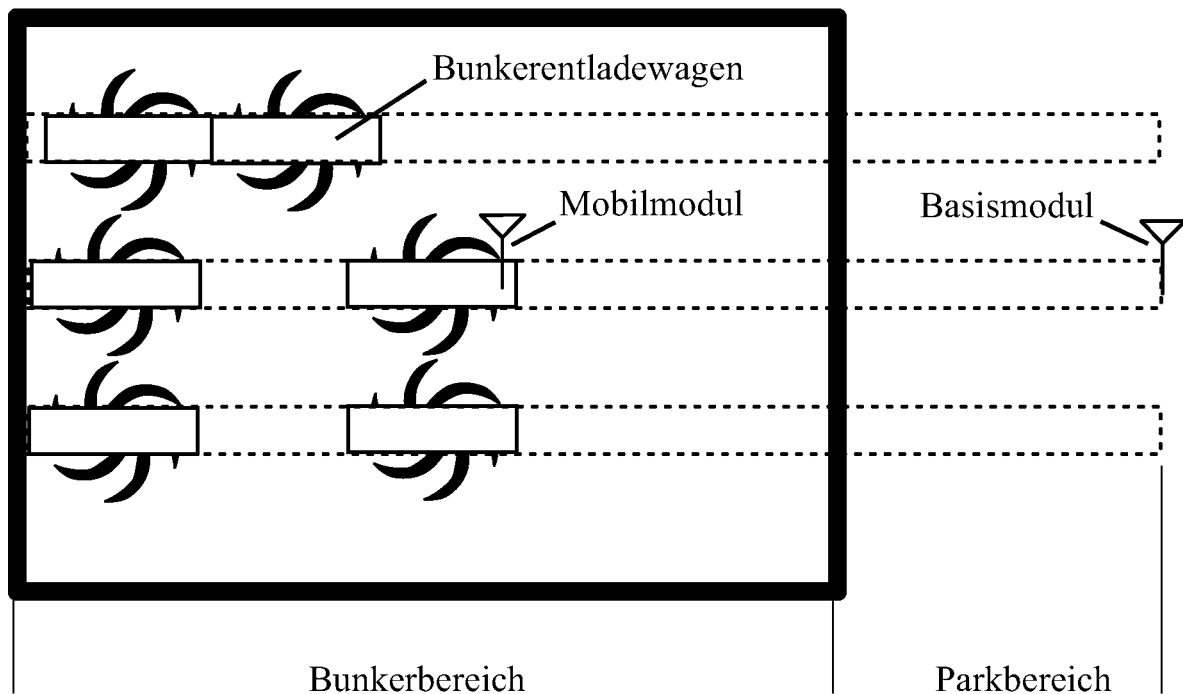


Abbildung 6.5: Aufbau des verwendeten Kohlenbunkers mit sechs Bunkerentladewagen auf drei Strecken.

Das Basismodul wurde mit einer 4-20mA-Schnittstelle ausgestattet, um die Daten in das Leitsystem des Kraftwerks zu integrieren und einen Vergleich mit den Daten des bereits installierten Lasermesssystems zu ermöglichen. Die Anbringung des Basismoduls wurde durch geeignete Stahl- und Aluminiumprofile realisiert. Das Mobilmodul wurde ebenfalls durch entsprechende Konstruktionen auf dem Entladewagen befestigt. Der Messaufbau ist in Abbildung 6.6 dargestellt.



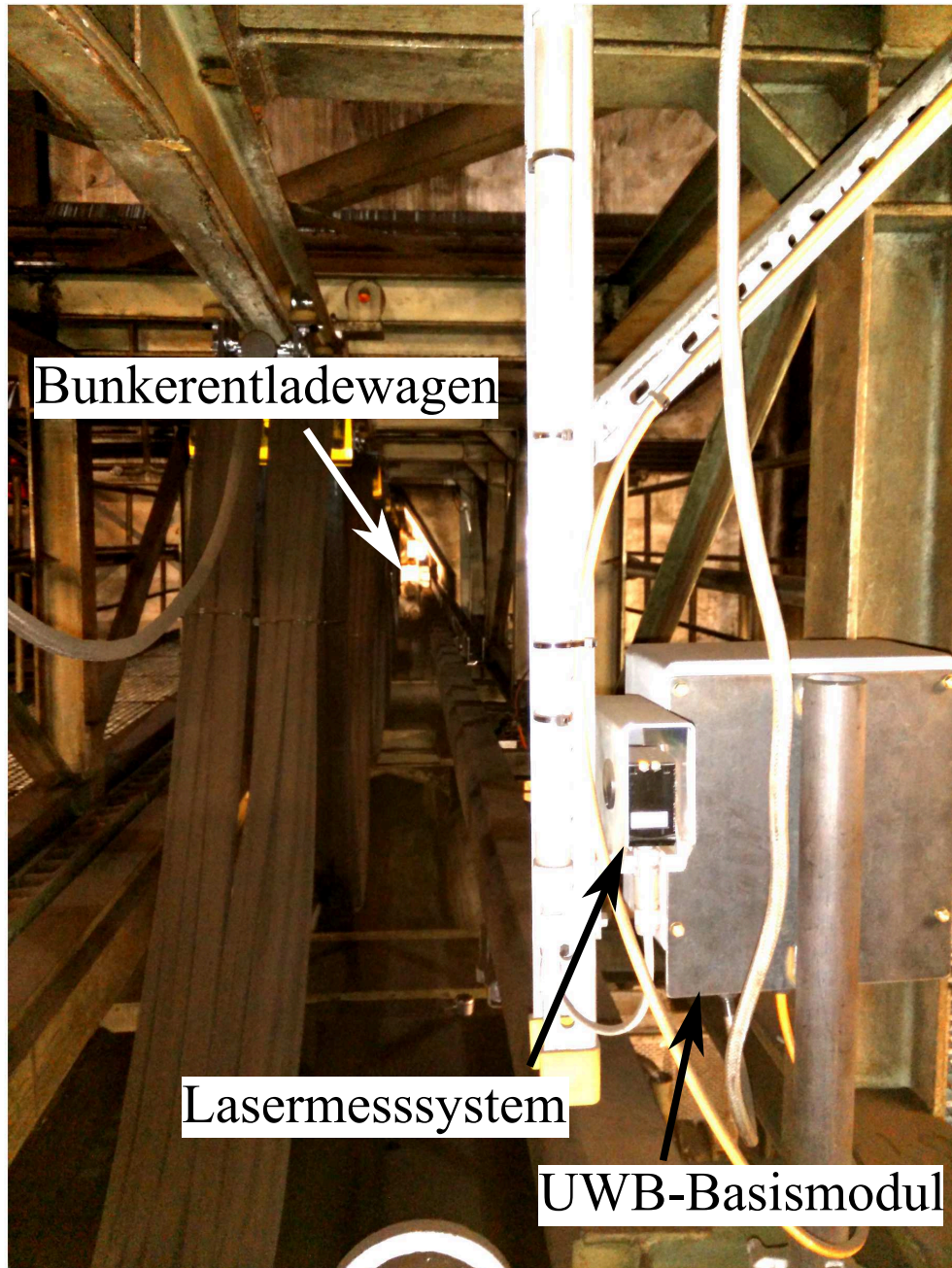


Abbildung 6.6: Messaufbau der Kohlenbunker-Installation. Im Vordergrund ist das Ende des Parkbereichs mit dem Lasermesssystem und dem Basismodul des UWB-Systems zu sehen. Im Hintergrund ist der mit dem Mobilmodul ausgerüstete Entladewagen im Tunnel zu sehen.

6.2.3 Durchführung

Das System wurde nach der Installation für drei Wochen betrieben. Während dieses Zeitraums wurde auch der Bunkerentladewagen kontinuierlich betrieben. Im normalen Einsatz fährt ein Wagen üblicherweise einen bestimmten Weg hin und her. Sowohl die Daten sowohl des Lasermesssystems als auch die des UWB-Systems wurden währenddessen in der Leitwarte aufgezeichnet und konnten so gegeneinander verglichen werden. In dem Messzeitraum wurde laut Mitarbeitern des Bunkerbetreibers mehrfach der oben beschriebene kritische Betriebszustand erreicht, in welchem die Staubbelastung maßgeblich steigt.

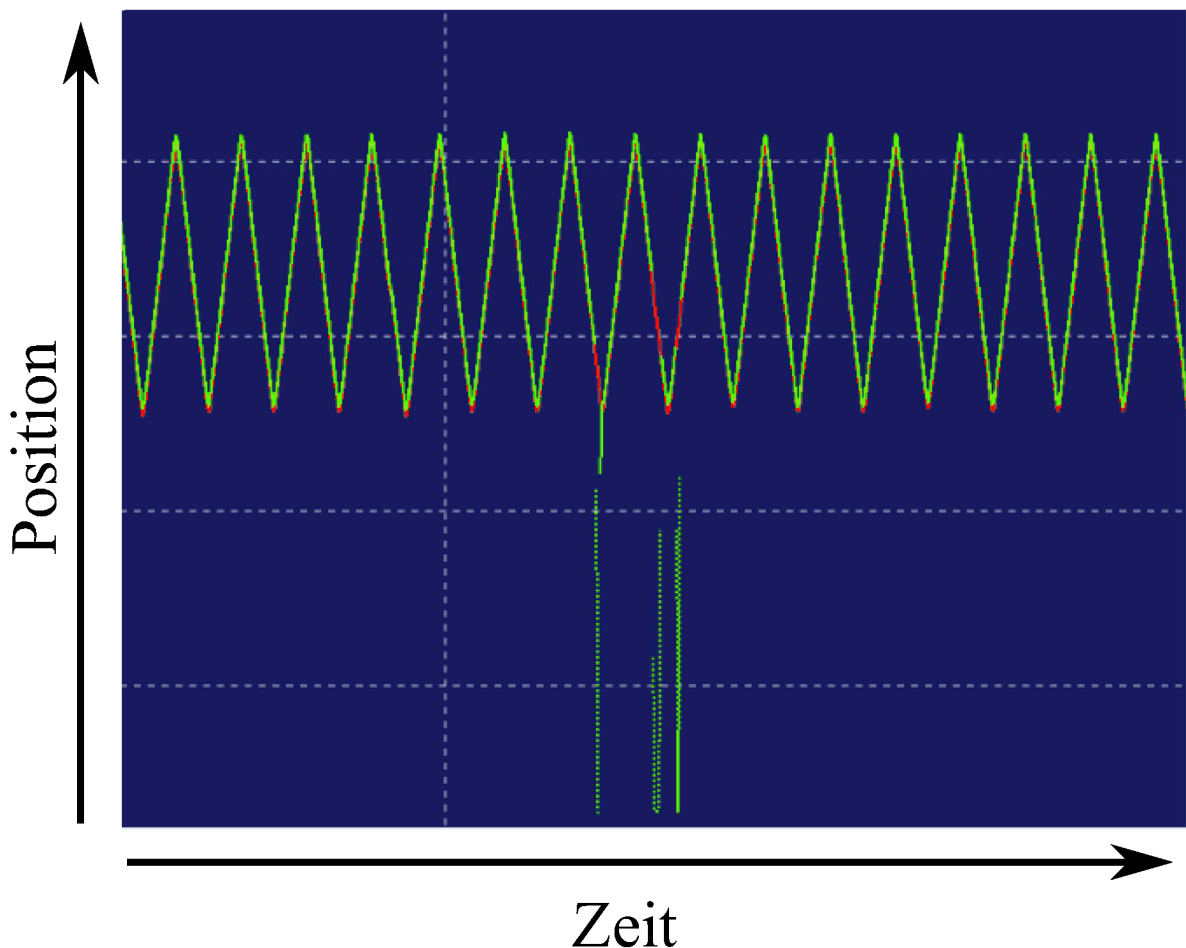


Abbildung 6.7: Messschrieb aus der Leitwarte während eines kritischen Betriebszustandes. Das Lasersystem ist in grün dargestellt. In der Mitte sind die Ausfälle des Systems zu erkennen. Das UWB-System ist in orange hinterlegt und funktioniert auch im kritischen Betriebsfall.



6.2.4 Ergebnisse

Die Messergebnisse des überwachten Zeitraums wurden nachträglich analysiert und verglichen. Ein Messschrieb aus der Leitwarte des Kraftwerks ist in Abbildung 6.7 dargestellt. Der grüne Messschrieb ist das Lasersystem, der orangene Messschrieb das UWB-System. In der Mitte kann man den Ausfall des Lasersystems erkennen. Während dieser Zeit war die Staubbelastung im Bunker sehr hoch, weshalb das Lasersystem keine plausiblen Werte ausgab. Die Lasermessdaten sind daher nicht-deterministisch. Weiterhin war jenes System nicht in der Lage die Fehlmessung zu erkennen. Die Messdaten des UWB-Systems folgen im normalen Betriebsfall sehr genau denen des Lasermesssystems. Die Abweichungen betragen ca. 5 cm und waren systematisch. Ursache hierfür war eine nicht-optimale Kalibration des UWB-Systems. Durch eine entsprechende Kalibration konnte dieser systematische Fehler eliminiert werden. Auch im kritischen Betriebsfall war das UWB-System in der Lage, weiterhin eine plausible Position des Entladewagens zu ermitteln.

Mit dieser Messung konnte gezeigt werden, dass das UWB-System auch unter extrem staubigen Umgebungsbedingungen korrekt funktioniert. Die Positionsbestimmung funktioniert auch dann noch wenn andere (optische) Systeme ausfallen. Das entwickelte System lief zuverlässig ohne Ausfälle über den gesamten Zeitraum der Installation von drei Wochen. Basierend auf diesen Ergebnissen ergibt sich ein großes Potential für den Einsatz dieser Technologie in ähnlichen Umgebungen und Anwendungen, wie sie z.B. bei der Ortung von Beladezügen in Kokereien auftreten.

6.3 Positionsbestimmung zwischen Bandschleifenwagen und Zwischenwagen

6.3.1 Ziel der Messung

Ziel einer weiteren Messung war die Positionsbestimmung des Zwischenwagens eines Absetzers. Der für die Messung verwendete Absetzer bezieht die zu verkippenden Abraummassen über eine Bandanlage. Die Übergabe des Abraums von der Bandanlage auf das Band 1 des Absetzers wird mittels eines Bandschleifenwagens realisiert. Dieses Band 1 fördert den Abraum dann auf einen Zwischenwagen, auf welchem die Übergabe auf das Band 2 erfolgt. Das Band 2 fördert den Abraum weiter zum Hauptgerät, wo das Material erneut Absetzerband übergeben wird (siehe Abbildung 6.8). Der Einsatz dieser verschiedenen Förderbänder ist nötig, um die er-

forderliche Bewegungsfreiheit des Absetzers zu gewährleisten. Bei einer Verfahrung des Absetzers ist daher zwangsläufig auch eine Verfahrung des Zwischenwagens notwendig. Diese wird derzeit halbautomatisch durchgeführt: Der Absetzer wird von einem Bediener gesteuert und der Zwischenwagen wird automatisch nachgeführt. Um eine Vollautomatisierung des Absetzers zu erreichen, ist ein Messsystem notwendig, welches unabhängig von bestehenden Systemen die Position des Zwischenwagens und des Absetzers ermitteln kann. Derzeit werden hierfür mechanische Dreh- und Lineargeber eingesetzt. Durch das UWB-System soll eine Redundanz eingeführt werden, mit welcher die Vollautomatisierung realisiert werden kann.

6.3.2 Messaufbau

Bei einer Bewegung des Zwischenwagens muss das Band 1 über dem Bandschleifenwagen verschoben bzw. der Winkel zwischen Bandschleifenwagen und Band 1 verändert werden. Der Verschiebeweg von Band 1 kann entsprechend den geltenden Betriebsvorschriften max. $\pm 2,50$ m betragen. Der Winkel zwischen Bandschleifenwagen und Band 1 beträgt maximal ± 23 .

Die Position der einzelnen Module muss so gewählt werden, dass die Anordnung für die Positionsbestimmung gut konditioniert ist. Hierzu sind die folgenden Punkte wichtig:

- durchgehende Sichtverbindung zwischen den Basismodulen und dem Mobilmodul,
- ausreichender Abstand zwischen den Basismodulen (größer als 8 m),
- exakt eingemessene Positionen der Basismodule (unter Zuhilfenahme geodätischer Instrumente) und
- mechanisch stabile Befestigungen aller Module, sodass sie auch unter mechanischen Einwirkungen (wie sie typischerweise im Betrieb auftreten) an den vorgesehen Positionen bleiben.

Für den Messaufbau kamen insgesamt drei Basismodule zum Einsatz. Diese waren in einem definierten Abstand zueinander auf dem Bandschleifenwagen angebracht. Das Mobilmodul war fest auf dem Zwischenwagen installiert. Der Installationsort der Module ist in Abbildung 6.8 dargestellt.

Die Energieversorgung der UWB-Module wurde durch eine vor Ort verfügbare 24 V-Spannungsversorgung gewährleistet. Die im Mobilteil integrierte Auswerteinheit wurde dann entsprechend der eingemessenen Basismodulpositionen konfiguriert. Basierend auf diesen Parametern kann auf dieser Einheit die Position des Bands 1



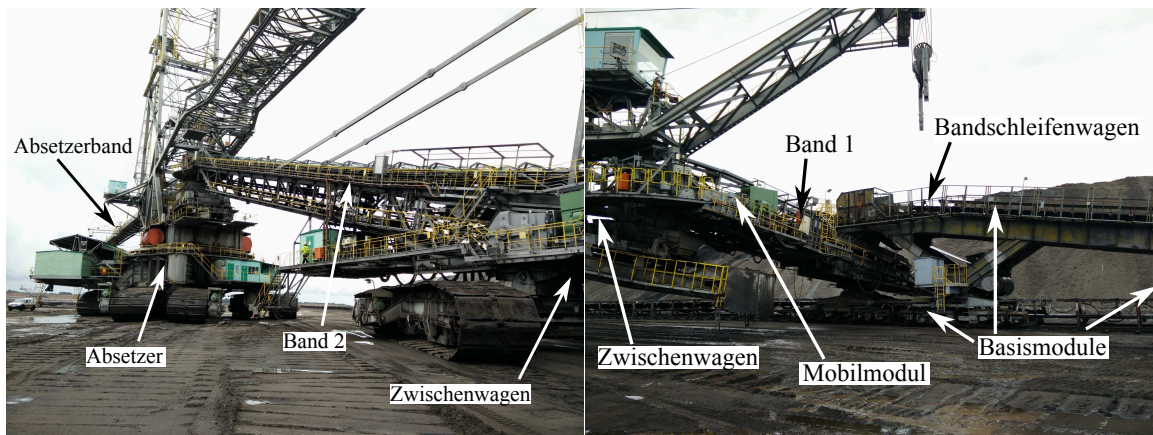


Abbildung 6.8: Aufbau der Positionsbestimmung für den Anwendungsfall Absetzer.

relativ zum Bandschleifenwagen online berechnet werden. Aus dieser Position berechnen sich dann die Parameter Verschiebeweg und Winkel. Weiterhin wurde eine PROFIBUS-Schnittstelle in das Gehäuse integriert, um diese Parameter an das Leitsystem des Betreibers zu geben. Der schematische Aufbau des Systems ist in Abbildung 6.9 dargestellt.

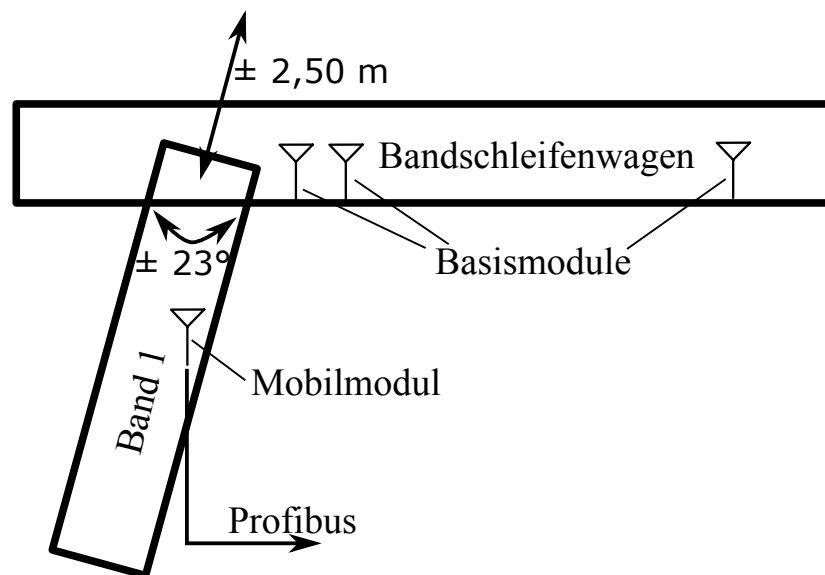


Abbildung 6.9: Schematischer Messaufbau für die Positionsbestimmung des Bandschleifenwagens. Im Gehäuse des Mobilmoduls wurde ebenfalls die PROFIBUS-Schnittstelle integriert.

6.3.3 Durchführung

Nach erfolgter Installation wurden verschiedene Datensätze aufgezeichnet, während der Absetzer in Betrieb war. In den meisten Fällen war kein Wunschprofil abfahrbar, da der Absetzer in Produktion und daher an die Vorgaben der Tagebauproduktion gebunden war. Die üblichen Bewegungen während dieses Prozesses bestanden aus Schwenkbewegungen um die Rotationsachse der Übergabe. Ab und zu war eine Längsbewegung beobachtbar und es wurden verschiedene Datensätze aufgezeichnet und ausgewertet.

6.3.4 Ergebnisse

Die Auswertung einer Positionsbestimmung ist in Abbildung 6.10 zu sehen. Die blaue Kurven stellen die ungefilterten Positionskomponenten (x , y und z) dar. Während des Messausschnitts schwenkte der Zwischenwagen um die Drehachse. Die Genauigkeit ist in x - und y -Richtung ca. ± 5 cm. In z -Richtung ist die Genauigkeit mit ± 20 cm wesentlich schlechter. Dies ist zu erwarten, da die Ankerkonfiguration eine große Ausdehnung in x - und y -Richtung aufwies. Die Apertur war daher in diesen Raumrichtungen groß, was dazu führte, dass der GDOP in diesen Richtungen sehr gut konditioniert war. In z -Richtung war die Ausdehnung vergleichsweise schlecht, daher war der GDOP in dieser Richtung auch schlecht. Der Effekt ist im Diagramm klar zu erkennen.

Durch eine geeignete Kálmán-Filterung der Daten kann die Genauigkeit in z -Richtung erhöht werden. Die Verbesserung ist bereits qualitativ in allen Raumrichtungen erkennbar, jedoch ist der Effekt in z -Richtung am Größten. Diese Anwendung zeigt das große Potential, welches in der geeigneten Datenverarbeitung steckt. Der Kálmán-Filter wurde hier auf den Anwendungsfall optimiert.

Diese Installation hat gezeigt, dass das entwickelte System auch für eine mehrdimensionale Ortung geeignet ist und tauglich für den Außeneinsatz ist. Mit dem System konnte die Position des Zwischenwagens bezogen auf den Bandschleifenwagen zuverlässig und kontinuierlich ermittelt werden. Diese Installation war Teil einer Evaluierung geeigneter Technologien, welche die Vollautomatisierung eines Absetzers ermöglichen sollen. Vorgreifend auf Kapitel 7 soll hier erwähnt werden, dass durch den Einsatz des UWB-Positioniersystems in Kombination mit den bereits existierenden Weg- und Winkelmessgeräten ein redundantes Positioniersystem aufgebaut werden kann, welches die Realisierung einer Vollautomatisierung ermöglicht.



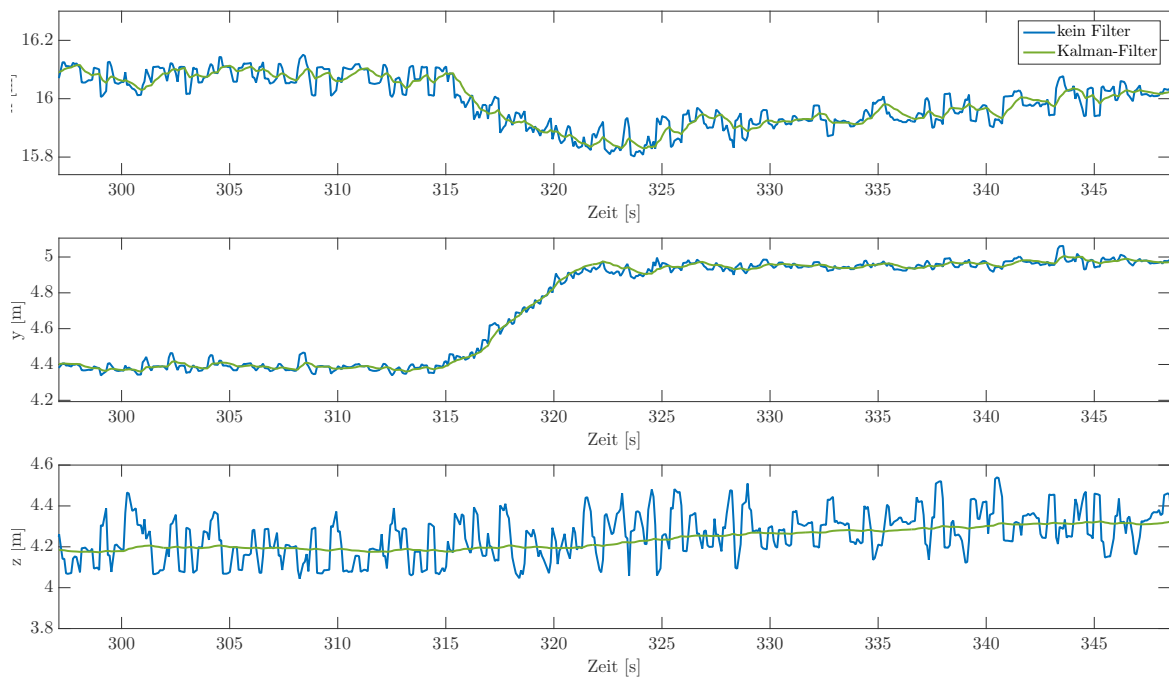


Abbildung 6.10: Auswertung der Positionsbestimmung des Bands 1 zum Bandschleifenwagen. Die blaue Kurve stellt die ungefilterte Position dar, in grün ist die Kálmán-gefilterte Position dargestellt.

6.4 Einsatz zur untertägigen Positionsbestimmung

6.4.1 Ziel der Messung

Im EU geförderten Forschungsprojekt Real-Time-Mining⁽ⁱ⁾ wird ein zukunftsweisendes Grubenplanungssystem erforscht [83]. Zentrales Element des Projekts ist die Erstellung eines Systems, welches Gesteins- und Maschinenparameter während des Betriebs an entscheidenden Stellen im Abbauprozess ermittelt und an ein zentrales Softwaresystem weiterleitet. Die Abbauplanung soll wesentlich reaktiver und agiler gestaltet werden, indem in Echtzeit auf Qualitätsänderungen im gewonnenen Mineral reagiert werden kann. Neben der Erforschung von geeigneten Sensortechnologien zur Gesteinsanalyse, Sensoren zur Maschinenanalyse und einem zentralen Software-Tool, welches die Planung durchführt, wird auch ein untertägiges Positionsbestimmungssystem erforscht, welches auf dem hier vorgestellten UWB-System und Inertialsensorik basiert. Dieses Positioniersystem dient dazu, die Position eines Betriebsmittels in der Mine zu ermitteln. Im Rahmen des Projekts wurden erste Messungen zur UWB-Ortung untertage durchgeführt. Diese Positionsbestimmung kann in zwei grobe Kategorien unterteilt werden (siehe Abbildung 6.11):

- Ortung in Strecken (>100 m). Hier ist hauptsächlich die Längsposition (in Richtung der Strecke) von Interesse. Die Querposition ist im Verhältnis zur Längsposition zu vernachlässigen, da sich das Betriebsmittel in dieser Richtung nicht wesentlich bewegen kann.
- Ortung in betriebskritischen Bereichen. Hier ist sowohl die Positionsbestimmung in Längs- als auch in Querrichtung von Interesse. Als Beispiel sei hier die Positionsbestimmung eines Bohrgeräts an der Abbaufont genannt.

Diese Unterscheidung ist sinnvoll, da sich die Anforderungen an die Infrastruktur ändern, je nachdem welche Art der Ortung erreicht werden soll.

6.4.1.1 1D-Positionsbestimmung von Betriebsmitteln in untertägigen Strecken

Wie bereits beschrieben ist in Strecken maßgeblich die Ermittlung der Längsposition von Interesse. Dies führt zu einer 1D-Positionsbestimmung. Um diese zu erreichen, sind Anker in regelmäßigen Abständen nötig. Die Distanz zwischen zwei Ankern ist davon abhängig, wie hoch die Reichweite der UWB-Signale ist. Die Distanz muss

⁽ⁱ⁾Gefördert von der EU unter Grant Agreement No. 641989



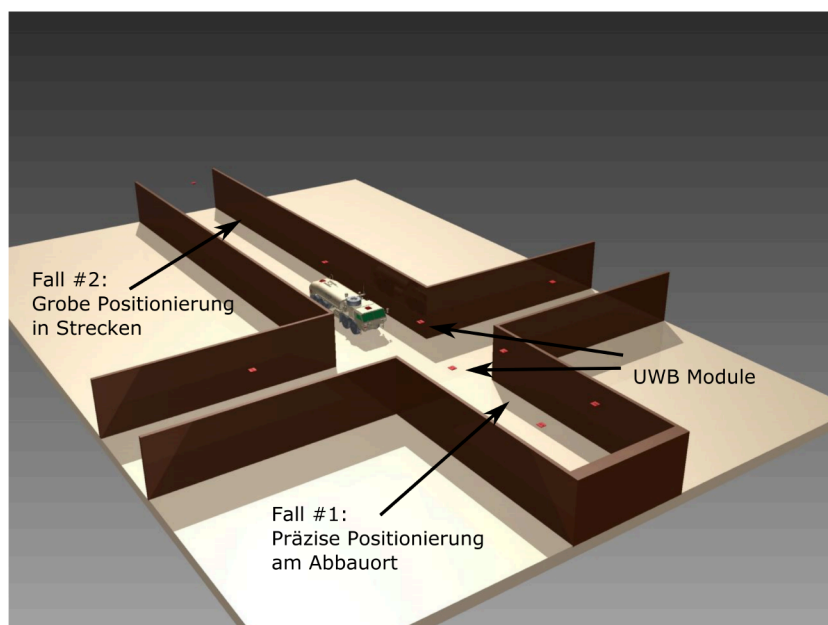


Abbildung 6.11: Konzept für die untertägige Positionsbestimmung.

dann maximal die doppelte Reichweite betragen, damit ein Tag immer mindestens einen Anker erreichen kann.

6.4.1.2 2D/3D-Positionsbestimmung von Betriebsmitteln und Arbeitsorganen

Im Gegensatz zur 1D-Positionsbestimmung in Strecken ist bei diesem Anwendungsfall mindestens eine 2D-Ortung notwendig. Diese wird erreicht, indem mindestens drei Anker im Sichtbereich des Tags auf dem Betriebsmittel angebracht werden. Wenn auf dem Betriebsmittel zwei Tags angebracht werden, kann nicht nur die Position, sondern auch die Orientierung ermittelt werden. Da hierzu ein größerer Infrastrukturaufwand zu leisten ist, ist dieser Anwendungsfall nur für Prozesse sinnvoll, in denen eine exakte Ortung einen Mehrwert generieren kann.

6.4.2 Messaufbau

Der Messaufbau bestand im Wesentlichen aus einem mobilen, schienengeführten Wagen auf welchem die Messtechnik installiert wurde (Abbildung 6.12). Dieser Messwagen wurde dann auf den Schienen durch die Messbereiche geschoben. Die verwendeten Systeme waren beide vorgestellten UWB-Systeme, sowie ein Laser-Geodimeter als Referenz. Im Rahmen der Messung wurden noch weitere Sensoren verwendet,

welche hier jedoch nicht betrachtet werden. Beide UWB-Systeme wurden per USB an den Messrechner angeschlossen. Auf diesem erfolgte die Datenaufzeichnung und -analyse unter Verwendung der in Kapitel 4.5.3 vorgestellten Software-Tools. Um eine Referenz aufzuzeichnen wurde ein Laser-Geodimeter vom Typ Geodimeter 640 verwendet. Auf dem Messwagen wurde ein Zielprisma installiert, welches vom Geodimeter automatisch verfolgt werden kann. Weiterhin wurde das Geodimeter per UART-Schnittstelle ebenfalls mit dem Messrechner verbunden, sodass die Referenzmessungen kontinuierlich und automatisch getätigt und zusammen mit dem UWB-Messdaten abgespeichert werden konnten. Das Geodimeter wies eine Entfernungsgenauigkeit von 2 mm auf.

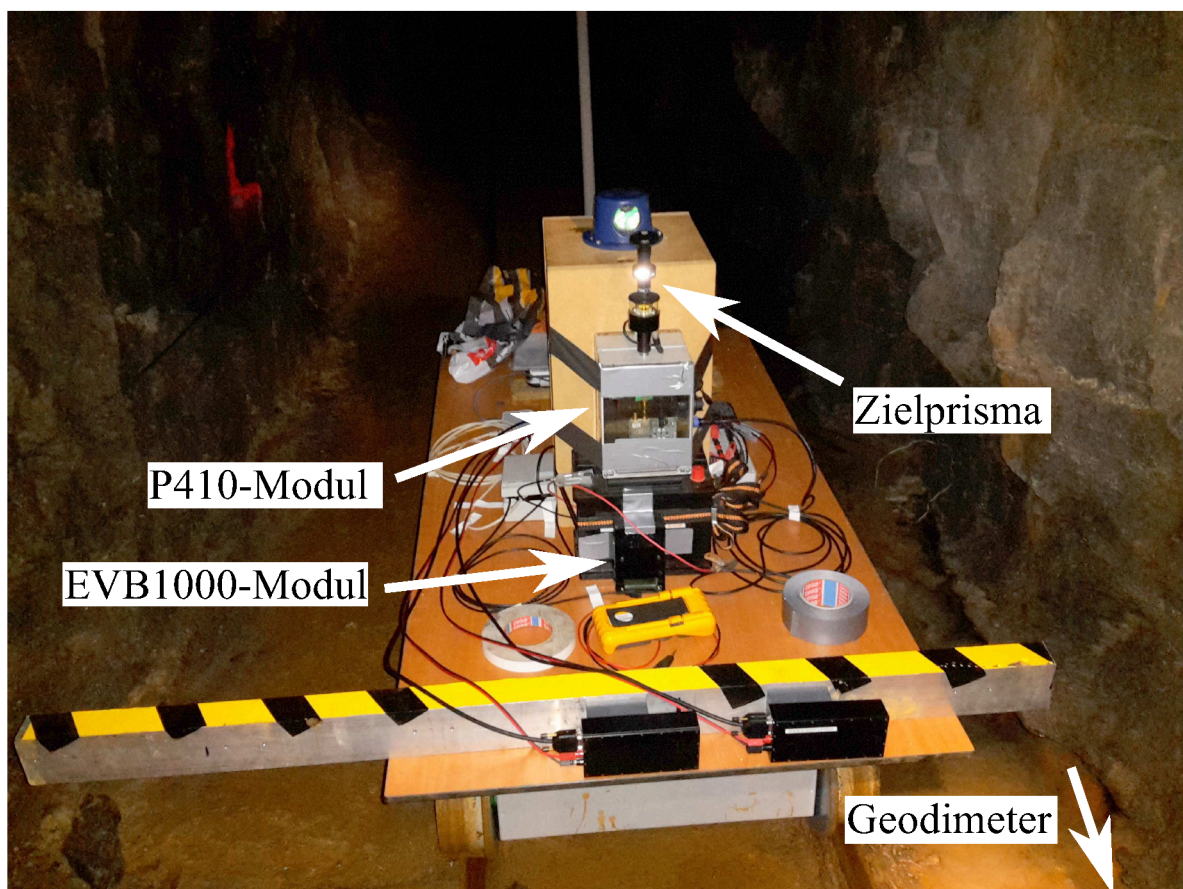


Abbildung 6.12: Messwagen für die untertägige Ortungsmessung.

6.4.3 Durchführung

Während der Messungen wurden alle Daten kontinuierlich aufgezeichnet und für die spätere Verarbeitung abgelegt. Sowohl die Daten des UWB-Systems als auch



die Geodimeter-Daten wurden parallel akquiriert und konnten so auch zeitlich in Relation gesetzt werden. Die Messungen wurden mehrfach wiederholt, wobei alle Durchläufe in einem Anwendungsfall dem gleichen Ablauf folgten.

6.4.3.1 1D-Positionsbestimmung

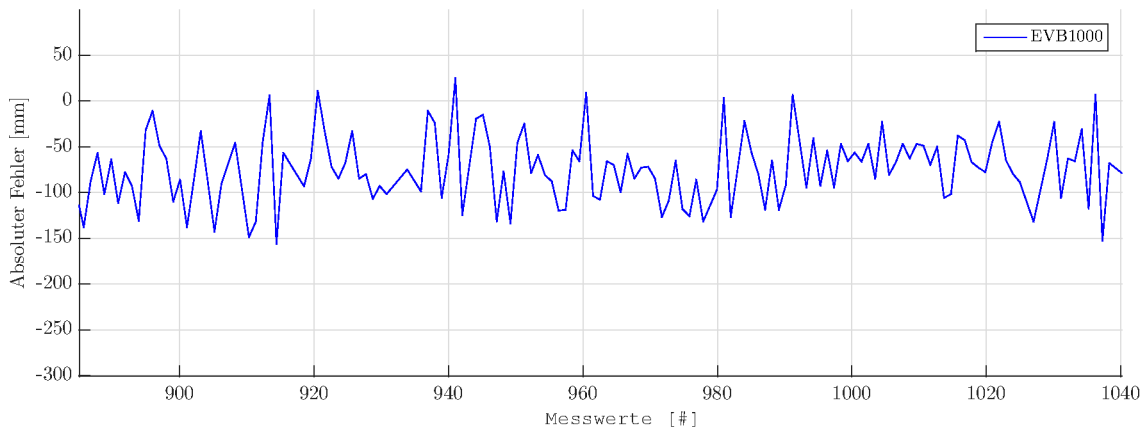
Um diesen Anwendungsfall zu testen, wurden in einer Richtstrecke am Anfang ein UWB-Anker und das Geodimeter aufgestellt. Der Wagen wurde dann in der 200 m langen Strecke auf den Schienen vom Anker weg und wieder zurück geschoben. Der Querschnitt der Strecke betrug ca. 1,80 m in der Breite und 1,90 m in der Höhe und folgte einer geraden Linie, sodass zu jeder Zeit eine Sichtverbindung zwischen Anker und Tag bestand. In Abständen von ca. 50 m wurde der Wagen angehalten und Messungen im stationären Betrieb durchgeführt. Der Anker wurde auf einem Stativ in einer Höhe von etwa 1,30 m aufgestellt mit ca. 30 cm Abstand zur Wand.

6.4.3.2 2D/3D-Positionsbestimmung

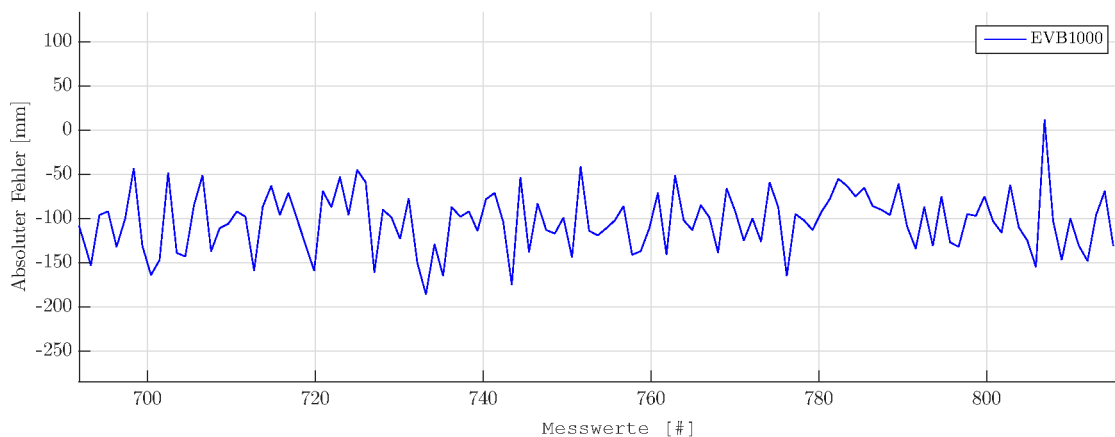
Für diese Anwendung wurde eine Umfahungsstrecke verwendet, welche einen kurvigen Verlauf aufwies. Es wurden drei Anker an den Wänden angebracht. Aus zeitlichen Gründen konnte bei dieser Messung nur das P410-System getestet werden. Wie beim vorigen Szenario wurde die Position des Wagens ebenfalls mit einem Lasertachymeter aufgezeichnet, um eine Referenz zu haben. Für die Messungen wurde der Wagen mehrfach in die Strecke hinein- und hinausgefahren.

6.4.4 Messergebnisse

6.4.4.1 1D-Positionsbestimmung



(a) Absoluter Fehler des EVB1000 im langen Tunnel bei einer Entfernung von ca. 185 m.



(b) Absoluter Fehler des EVB1000 im langen Tunnel bei einer Entfernung von ca. 150 m.

Abbildung 6.13: Absoluter Fehler des EVB1000 im langen Tunnel.

Die Ergebnisse der Messung wurden nach mittlerer Abweichung und Standardabweichung ausgewertet. Um die mittlere Abweichung zu berechnen wurde die Differenz der UWB-Messung zur Tachymeter-Messung gebildet. Dieser Wert bildet den sogenannten absoluten Fehler. Für das EVB1000-System ergibt sich bei einer Entfernung von 185 m ein durchschnittlicher absoluter Fehler von -50 mm (siehe Abbildung 6.13a). Dieser Fehler ist prinzipiell durch eine exakte Kalibrationsmessung auszugleichen. Jedoch ergibt sich bei einer Entfernung von 150 m ein durchschnittlicher absoluter Fehler von -100 mm (siehe Abbildung 6.13b). Hier zeigt sich, dass die



Kalibration des EVB1000-Systems nicht eindeutig und leicht entfernungsabhängig ist. Für diese Messungen wurde eine 2D-Positionsbestimmung durchgeführt. Es ist jedoch ohne Weiteres möglich, die Auswertung in die dritte Dimension zu erweitern. Hierfür müssen die Anker in der z-Achse verteilt werden. Dies war in den hier durchgeführten Testmessungen jedoch aufgrund der Beschaffenheit der Strecke nicht machbar.

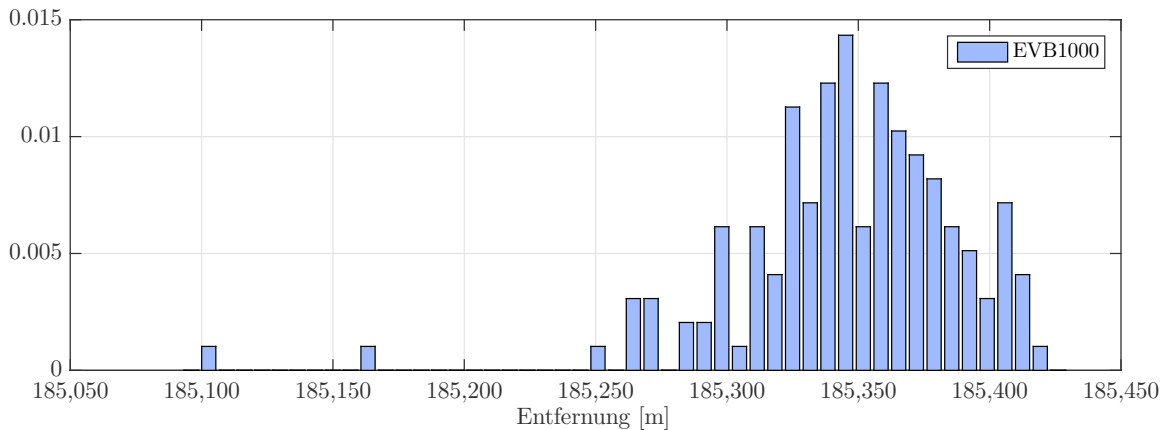


Abbildung 6.14: Häufigkeitsverteilung des EVB1000 im langen Tunnel bei einer Entfernung von ca. 185 m.

Die Häufigkeitsverteilung der EVB1000-Systems ist in Abbildung 6.14 dargestellt. Hieraus lässt sich eine Abweichung von ca. ± 5 cm ablesen. Die Analyse der anderen Entfernungsmessungen zeigte, dass keine offensichtliche Abhängigkeit der Standardabweichung von der Entfernung existierte.

Für das P410-System zeigte sich keine Abhängigkeit des durchschnittlichen absoluten Fehlers von der Entfernung. Dieser lag bei ca. -65 mm (siehe Abbildung 6.15). Da dieser nicht entfernungsabhängig war, kann er durch entsprechende Kalibrationsmaßnahmen kompensiert werden. Im der Abbildung ist ein Ausreißer zu sehen, welcher wahrscheinlich durch eine durchlaufende Person im Messbereich hervorgerufen wurde. Solche Ausreißer können durch geeignete Outlier-Filter (siehe 4.6) eliminiert werden. Die Häufigkeitsverteilung der Messungen zeigt eine Standardabweichung von ca. $\pm 0,5$ cm (siehe Abbildung 6.16).

Beim Vergleich der Systeme zeigt sich, dass das P410-System dem EVB1000-System überlegen ist, sowohl beim absoluten Fehler, als auch bei der Standardabweichung. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass das EVB1000-System einem Evaluierungskit entspricht und nicht unbedingt hinsichtlich Zuverlässigkeit und Qualität optimiert

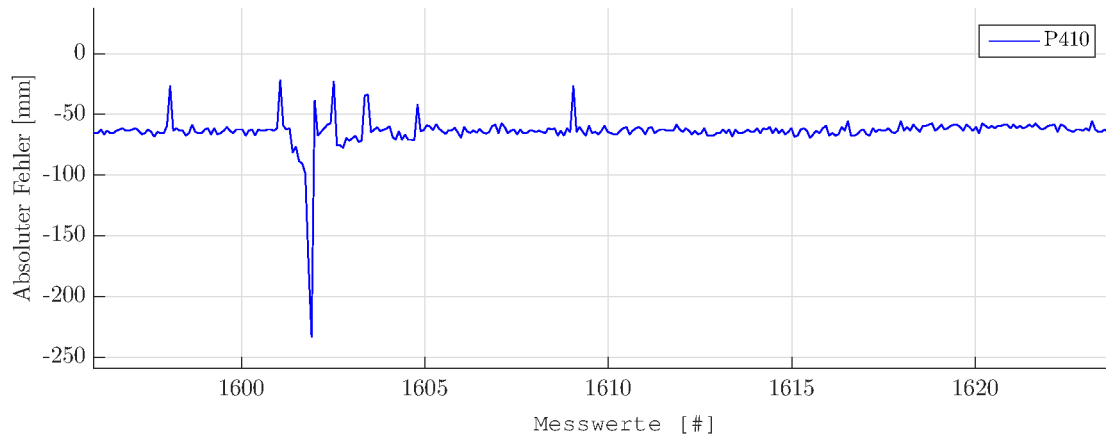


Abbildung 6.15: Absoluter Fehler des P410 im langen Tunnel bei einer Entfernung von ca. 188 m.

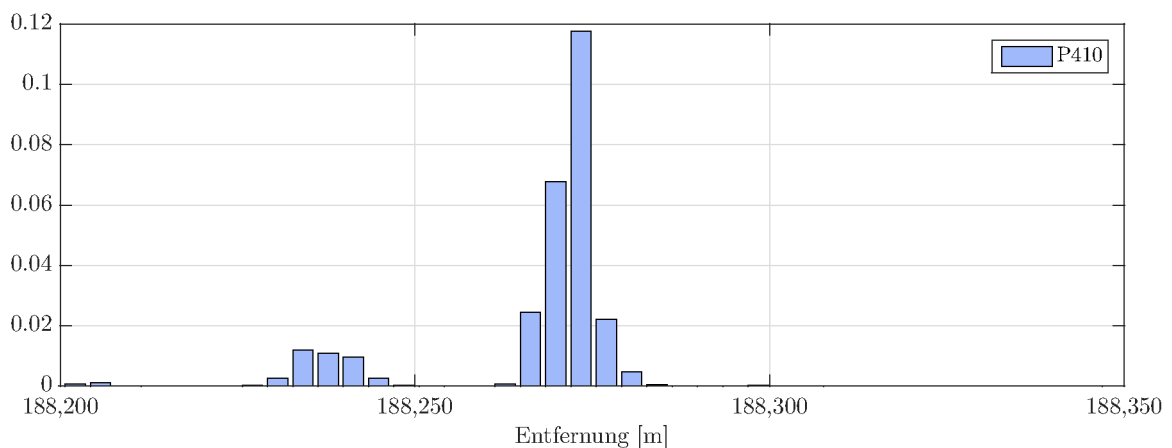


Abbildung 6.16: Häufigkeitsverteilung des P410 im langen Tunnel bei einer Entfernung von ca. 188 m.

ist, wie dies bei dem P410-System der Fall ist. Insgesamt sind die gemessenen Werte alle im zu erwartenden Bereich. Sie stimmen überein mit den Ergebnissen der Labormessungen. Es zeigt sich, dass die UWB-Technologie ebenfalls in untertägigen Umgebungen und unter extremen Multipfad-Bedingungen gut funktioniert.

6.4.5 2D/3D-Positionsbestimmung

Die Daten für diesen Anwendungsfall wurden mit einer 2D-Positionsbestimmung ausgewertet. Anschließend wurde ein Mittelwertfilter eingesetzt, um das Ergebnis zu optimieren. Die Trajektorien beider Varianten sind in Abbildung 6.17 dargestellt.



Abgebildet ist die Fahrt vom Start (bei den Anker) weg - von rechts unten nach links oben. Die weiteren Fahrten zeigten einen ähnlichen Verlauf. Zu Beginn der Fahrt, wo

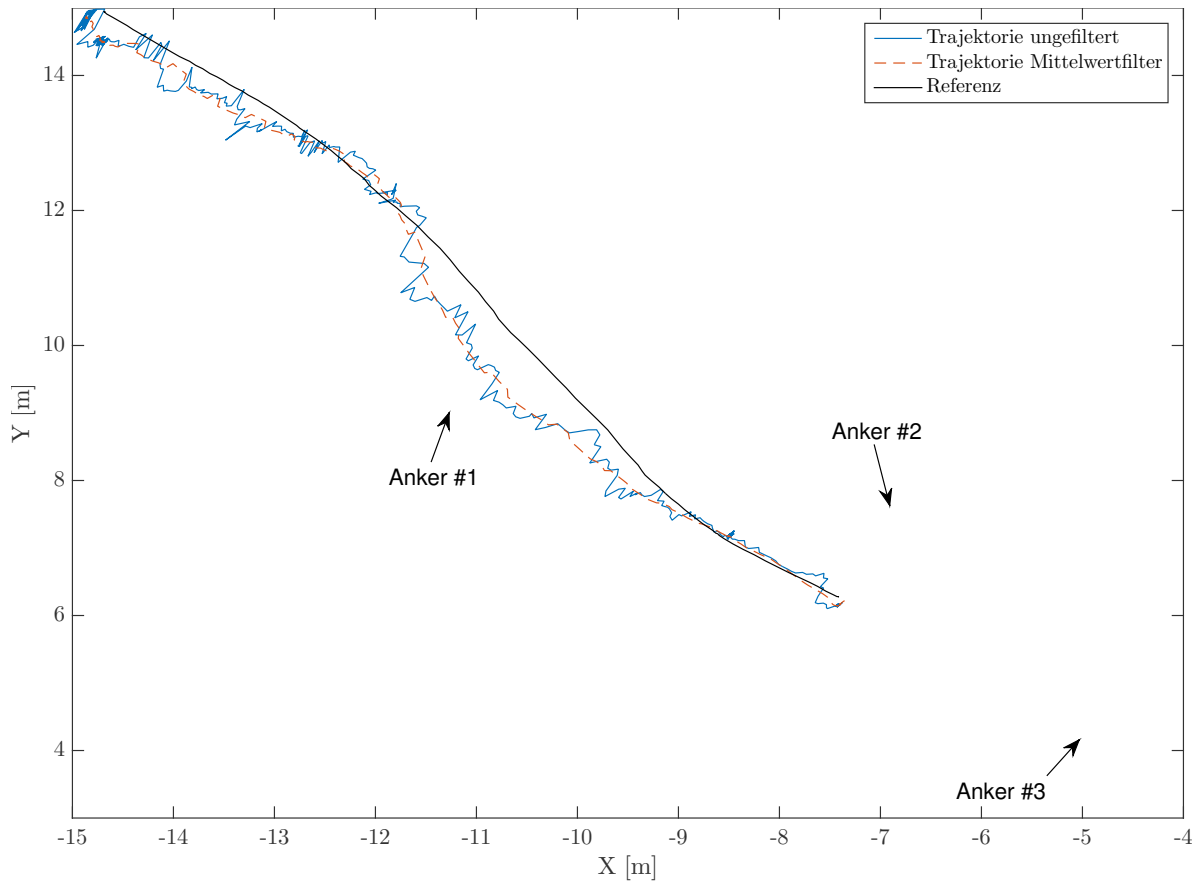


Abbildung 6.17: Trajektorie der untertägigen exakten Ortung im kurvigen Tunnel (P410).

sich der Tag noch zwischen den Ankern befindet, ist das Ergebnis recht kontinuierlich von hoher Qualität (es zeigen sich kaum Ausreißer). Im weiteren Verlauf, bei dem der Tag sich immer weiter von den Ankern entfernt, zeigen sich deutlichere Ausreißer. Dies ist durch die schlecht konditionierte Apertur zu erklären, welche hauptsächlich in einer Dimension ausgedehnt ist (entlang der Diagonale von rechts unten nach links oben). Entlang der orthogonalen Diagonale weist die Apertur kaum Ausdehnung auf. Daher ist hier eine größere Unsicherheit der Positionsbestimmung zu erwarten. Durch Einsatz eines Mittelwertfilters für die Positionsbestimmung können zwar die stochastischen Einflüsse dieser schlechten Apertur weitgehend kompensiert werden, jedoch bleiben relativ große Abweichungen zur aufgezeichneten Referenz bestehen: Insbesondere im mittleren Bereich weicht das Positionierungsergebnis bis zu einem halben Meter von der Referenz ab. Hierfür sind zum einen schlecht eingemessene Anker

verantwortlich: Die Position der Anker konnte in diesem Fall nur ungefähr bestimmt werden, da deren Position nur zu einem Punkt auf der Gehäuseaußenseite gemessen wurde. Da die Antenne im Inneren jedoch nicht exakt auf diesem Punkt sitzt, müsste dieser Versatz rechnerisch bestimmt werden. Dies war hier jedoch nicht möglich, da die Orientierung der Gehäuse relativ zur Tachymeterposition nicht bekannt war. Weiterhin waren die UWB-Module nicht kalibriert worden, was zu einer weiteren systematischen Ungenauigkeit führt. Insgesamt zeigt sich jedoch, dass das UWB-System auch für diesen Anwendungsfall geeignet ist. Während der Messung traten keine Ausreißer oder Ausfälle auf, was für die Robustheit des entwickelten Systems spricht.



7 Erhöhung der Prozesssicherheit

Wie im vorigen Kapitel aufgeführt, kann das hier entwickelte Positioniersystem nicht nur in herausfordernden Umgebungsbedingungen entscheidende Vorteile in Bezug auf Robustheit und Genauigkeit liefern. Insbesondere bei sicherheitskritischen Anwendungen kann der Einsatz eines solchen unabhängigen Ortungssystems Vorteile bieten. Auf diesen Nutzen soll in diesem Kapitel näher eingegangen werden.

Der Begriff Prozesssicherheit soll hier näher erläutert werden. Es gibt verschiedene Aspekte, die die Prozesssicherheit beeinflussen. Die offensichtlichsten sind:

- Sicherheit im klassischen Sinne: Die Gewährleistung der Unversehrtheit des Personals, welches sich im Gefahrenbereich der Maschine / des Prozesses aufhält und
- Zuverlässigkeit / Verfügbarkeit: Sicherheit bezogen auf die Verfügbarkeit der Maschine / des Prozesses, und damit die Sicherheit der wirtschaftlichen Nutzung der Maschine / des Prozesses.

Der vorliegende Abschnitt setzt sich hauptsächlich mit dem zweiten Aspekt auseinander.

7.1 Prozesssicherung & Zuverlässigkeit

Der Begriff der Prozesssicherung umfasst alle Maßnahmen, die dafür Sorge tragen, dass ein Prozess auch beim Auftreten von unvorhergesehen oder fehlerhaften Einflüssen weiterhin funktioniert. Hierbei soll nun eine Unterscheidung zur Arbeitssicherheit getroffen werden: Der Prozesssicherung dient in erster Linie die Wirtschaftlichkeit des Prozesses / des Betriebs als Zielgröße. Dies steht im Unterschied zur Arbeitssicherheit, welcher die menschliche Unversehrtheit zum Ziel hat. Die VDI/VDE-Norm 2180 bietet eine Grundlage, nach welcher eine Prozesssicherung erfolgen kann [84]. Die Norm unterscheidet hinsichtlich einer Automatisierungsanlage drei Stufen:

- Stufe 1: Sensorik, Aktorik und Prozessorik können die Anlage im Normalfall führen. Im Fehlerfall (z.B. bei Überschreiten gewisser Kennwerte) kann die Anlage wieder in den Normalfall zurück gesteuert werden.



- Stufe 2: Zusätzlich zur Stufe 1 wird hier berücksichtigt, dass die Überwachungssensorik ausfallen kann. Hierbei wird also eine weitere - von der ersten Überwachungsebene unabhängige - Überwachungssensorik eingeführt.
- Stufe 3: Bei dieser Stufe wird angenommen, dass die komplette Automatisierungsanlage ausfallen kann. Eine vollständig unabhängige, zweite Anlage wird hierbei in heißer Redundanz gehalten, welche im Fehlerfall die Kontrolle übernehmen kann.

Das Erreichen höherer Stufen ist jedoch immer zu dem Schaden, welcher im Fehlerfall auftritt, ins Verhältnis zu setzen. Dies ist in entscheidendem Maße vom individuellen Fehlerfall abhängig. In einigen Fällen kann ein Ausfall der Stufe 1 innerhalb kürzester Zeit behoben werden und sorgt für einen geringen oder gar keinen messbaren Verlust. In vielen Fällen jedoch ist ein Ausfall der Automatisierung ebenfalls untrennbar mit einem Verlust verbunden. Der Betreiber eines solchen Prozesses hat ein großes Interesse daran, diesen Verlust einzudämmen. Selbstverständlich müssen die Investitionskosten, welche das Erreichen einer höheren Stufe ermöglichen, sich nach einer vertretbaren Zeit amortisieren.

Im Rahmen dieser Arbeit bewegen wir uns auf dem Sensorik-Level. Um in einer Automatisierungsanlage, welche bereits auf Stufe 1 automatisiert wurde, nun die nächste Stufe zu erreichen, muss weitere Sensorik - unabhängig von den existierenden - installiert werden. An dieser Stelle ergibt sich ein großes Marktpotential für das entwickelte Positioniersystem. Viele der sich derzeit im Betrieb befindlichen Anlagen im Schwermaschinenbau bewegen sich auf Stufe 1 - einige sogar auf Stufe 0, was einer nicht-automatisierten Anlage entspricht. Bei diesen Anlagen werden häufig Dreh- und/oder Lineargeber eingesetzt, um Entfernungen zu messen. Um die Stufe 2 zu erreichen, wird ein weiteres Messsystem benötigt, welches unabhängig von der existierenden Sensorik arbeitet, d.h. ein Ausfall der neuen Sensorik darf nicht zum Ausfall der bestehenden führen und umgekehrt. Dies kann durch das UWB-Positioniersystem gewährleistet werden, da es vollständig unabhängig von Linear-/Drehgebern arbeiten kann. Eine Erhöhung der Prozesssicherheit - und damit verbunden des Gewinns - kann hier erreicht werden. [85]

7.2 Zuverlässigkeitsbetrachtung am Beispiel eines Betonspritzgerät-Auslegers

Als Anschauungsbeispiel dient der Ausleger eines Betonspritzgeräts (Abbildung 7.1). Dieses Beispiel bietet eine mechanisch anspruchsvolle und komplexe Kinematik. Gerade in solchen Fällen bietet sich der Einsatz eines unabhängigen Positioniersystems an, wie im Folgenden gezeigt wird. Prinzipiell ist die folgende Betrachtung auf alle Betriebsmittel anwendbar, welche zur Erfüllung ihrer Aufgabe einen Ausleger nutzen und diesen genau positionieren müssen. Dazu wird nach erfolgtem Schnitt bzw. Sprengen und Bergen des Materials das Betonspritzgerät in diesen Bereich vorgerückt und anschließend werden die Seitenwände und die Decke mit Spritzbeton besprüht. In bestimmten Fällen kann vor dem Aufbringen des Betons eine Bewehrung in die Spritzbetonschicht eingebracht werden. [86]

Der Spritzbeton wird über den Ausleger zur Düse gepumpt, welche sich an der Spitze des Auslegers befindet. Das Gerät steht während des Vorgangs still und die Düse wird dem Tunnelbogen nachgeführt. Dies erfordert eine bewegliche Kinematik, welche meist durch sechs Freiheitsgrade gekennzeichnet ist. Die Düse kann damit exakt positioniert und gesteuert werden und dem dreidimensionalen Tunnelprofil folgen. Der Prozess erfordert eine hohe Genauigkeit, da die Schichtdicken, welche aufgetragen werden, gewissen Anforderungen unterliegen: Übliche Schichtdicken, die in einem Arbeitsschritt aufgetragen werden, liegen - je nach Anforderung - im Bereich von 5 cm bis 10 cm und dürfen nicht mehr als 2 cm bis 3 cm von der Vorgabe abweichen. Als zusätzliche Schwierigkeit kommt hinzu, dass das geschnittene Tunnelprofil nicht plan ist, sondern Erhebungen und Senken aufweist; eine adaptive Steuerung der Düse ist erforderlich, um eine plane Fläche zu erreichen.

7.2.1 Zuverlässigkeit mit Dreh-/Lineargebern

Die Positionsbestimmung der Düse ist bei der beschriebenen Anwendung von zentralem Interesse. Um die Position der Düse relativ zum Fahrzeug zu ermitteln, können Dreh- und Lineargeber eingesetzt werden. Erstere messen die Drehung eines Drehgelenks, letztere die Längsposition einer Lineareinheit. Die Position der Düse ist demnach aus der Kombination dieser Sensoren abzuleiten. Dabei ergibt sich die Position durch Vorwärtstransformation (Verkettung) der einzelnen Sensordaten. Falls nun einer der Sensoren in der Messkette einen Fehler aufweist, wirkt sich dieser Fehler direkt auf das Ergebnis aus. Die Position der Düse kann nicht mehr zuverlässig





Abbildung 7.1: Ein klassisches Betonspritzgerät (Fundstelle: Internet).

sig bestimmt werden. Die Überlebenswahrscheinlichkeiten eines Elementes werden üblicherweise mit p_i angegeben. Bei einem Ausleger mit sechs Gelenken ergibt sich das Zuverlässigkeits-Blockdiagramm wie in Abbildung 7.2 dargestellt.

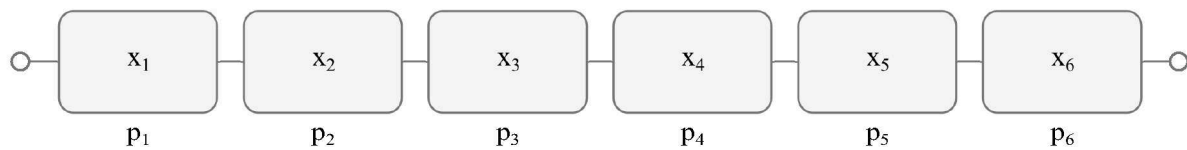


Abbildung 7.2: Zuverlässigkeits-Blockschaltbild der Serienschaltung zur Positionsbestimmung der Düse am Ausleger. p_i gibt die Überlebenswahrscheinlichkeit an.

Die Überlebenswahrscheinlichkeit R der Funktion „Positionsbestimmung Düse (Dreh-/Lineargeber)“ ergibt sich damit nach [87] zu

$$R_{\text{Serie}}(p) = \prod_{i=1}^6 (p_i). \quad (7.1)$$

Die Überlebenswahrscheinlichkeit des Seriensystems ist immer kleiner als die der schlechtesten Komponente (des Seriensystems). Für eine Überlebenswahrscheinlichkeit von $p_i = 0,95$ ergibt sich die Gesamt-Überlebenswahrscheinlichkeit zu:

$$R_{\text{Serie}}(0,95) = 0,735092. \quad (7.2)$$

Dieser Wert soll hier als Vergleichswert genutzt werden und hat keine direkte, prakti-

sche Aussagekraft.

7.2.2 Zuverlässigkeit mit UWB-Positioniersystem

Die Position der Düse kann ebenfalls mit dem UWB-System ermittelt werden. Dazu sind an der Düse ein Tag und am Fahrzeug mindestens drei Anker notwendig. Damit kann über die beschriebenen Verfahren die Position der Düse relativ zum Fahrzeug ermittelt werden. Der Vorteil gegenüber der Lösung mit Dreh-/Lineargebern besteht im Wesentlichen darin, dass die Messung der Position unabhängig von der Kinematik ist. Falls ein Fehler in der Kinematik (und damit womöglich auch in den Gebern) auftritt, kann dies sofort erkannt werden, da die Positionsermittlung vollständig unabhängig von der Mechanik ist. Verschleißbedingtes Spiel in den Gebern, welches sich über die Betriebszeit einstellen kann, kann durch eine geeignete Regelung ausgeglichen werden, da das UWB-System eine „absolute“ Positionsbestimmung ermöglicht. Das Zuverlässigkeits-Blockdiagramm für das UWB-System ist ebenfalls ein Seriensystem, da es in der Minimalkonfiguration die Funktionsfähigkeit aller vier UWB-Module voraussetzt. Es können jedoch ohne großen Aufwand mehrere UWB-Anker eingesetzt werden. Hierdurch wird eine Redundanz im UWB-System eingeführt. Dies hat für die Erfüllung der Funktion mehrere Vorteile:

- die Genauigkeit der Positionsbestimmung wird erhöht,
- der Ausfall eines Ankers hat keinen vollständigen Funktionsverlust zur Folge und
- die Nutzung von mehreren Tags an der Düse erlaubt die Ermittlung der Orientierung der Düse.

Für den Fall, dass auf dem Fahrzeug vier UWB-Anker angebracht werden, ergibt sich ein 3v4-System: Es müssen nur drei der vier angebrachten UWB-Anker funktionsfähig sein, um die Funktion zu erfüllen (Abbildung 7.3). Das System muss einen sogenannten Voter enthalten, welcher die Funktionsfähigkeit der einzelnen UWB-Anker bewerten kann und die funktionsfähigen auswählt. Dieser Voter ist üblicherweise in dem Auswertesystem integriert und wird der Berechnung der Position vorgeschaltet.

Die Zuverlässigkeit der Funktion „Positionsbestimmung Düse (UWB-System)“ ergibt sich damit nach [87] zu:

$$R_{3v4}(p) = \sum_{k=3}^4 \binom{4}{k} \cdot p^k \cdot (1-p)^{4-k}. \quad (7.3)$$



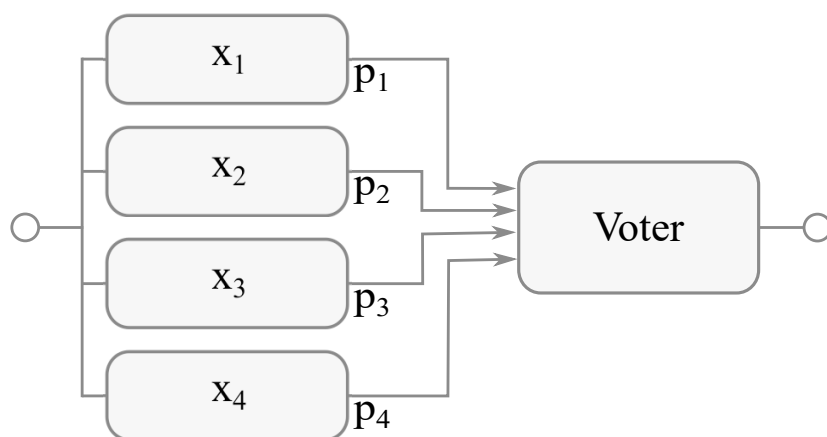


Abbildung 7.3: Zuverlässigkeits-Blockschaltbild des 3v4-Systems zur Positionsbestimmung der Düse am Ausleger. p_i gibt die Überlebenswahrscheinlichkeit an.

Es wurde hier vorausgesetzt, dass die Überlebenswahrscheinlichkeiten aller UWB-Anker gleich sind. Zudem ist die Betrachtung des Voters außer Acht gelassen. Da der Voter auf dem Rechnersystem läuft, auf dem auch die Auswertung stattfindet und dieses Rechnersystem ebenfalls in der Dreh-/Winkelgeber-Implementierung notwendig ist, kann diese Annahme sinnvoll getroffen werden. Bei Annahme der Überlebenswahrscheinlichkeit $p_i = 0,95$ ergibt sich die Gesamtüberlebenswahrscheinlichkeit zu

$$R_{3v4}(0,95) = 0,985981. \quad (7.4)$$

Durch die Einbringung von Redundanzen auf Sensor-Level ergibt sich eine Erhöhung der Zuverlässigkeit um ca. 34% im Vergleich zum dreh-/lineargegeberbasierten System. Zusätzlich zu der Redundanz auf Sensor-Level kann ebenfalls eine Redundanz auf der nächsthöheren Ebene eingeführt werden.

7.2.3 Zuverlässigkeit beider Systeme im Verbund

Die Nutzung verschiedener Systeme, die gleichzeitig vorhanden sind, stellt die wahrscheinlich häufigste Variante der Redundanz dar. In diesem Beispiel sollen sowohl das Dreh-/Lineargeber-System als auch das UWB-System eingesetzt werden. Damit ergibt sich ein diversitär redundantes System. Dieses ist diversitär redundant, weil die eingesetzten Systeme, welche die gleiche Funktion erfüllen sollen, unterschiedliche physikalische Wirkprinzipien und Teilsysteme verwenden.

Die Überlebenswahrscheinlichkeit des diversitär redundanten Systems (Abbildung 7.4)

ergibt sich nach [87] zu:

$$R_{div,red}(p_i) = 1 - \prod_{i=1}^2 (1 - p_i). \quad (7.5)$$

Bei den errechneten Überlebenwahrscheinlichkeiten der Einzelsysteme berechnet sich die Gesamtüberlebenschance zu

$$\begin{aligned} R_{div,red}(p_{UWB}, p_{Dreh-/Linear}) &= 1 - [(1 - p_{UWB})(1 - p_{Dreh-/Linear})] \\ &= 0,996286. \end{aligned} \quad (7.6)$$

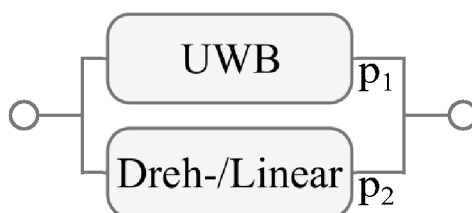


Abbildung 7.4: Zuverlässigkeits-Blockschaltbild des diversitär redundanten Systems zur Positionsbestimmung der Düse am Ausleger. p_i gibt die Überlebenschance an.

Durch den Einsatz beider Systeme im Verbund erhöht sich zum einen die Überlebenschance im Gegensatz zu den Einzellösungen. Weiterhin kann durch den parallelen Einsatz ein Prozess, welcher sich im Automatisierungslevel auf Stufe 1 befindet, auf Stufe 2 erhöht werden. Durch den Ausfall eines Systems ist die Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems nicht gefährdet.

7.3 Funktionale Sicherheit

IEC 61508 - *Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-related Systems* ist der Hauptstandard für die funktionale Sicherheit. Die Norm IEC 62061 ist die maschinenspezifische Norm. Sie befasst sich mit Risikobewertung von Maschinen und Anlagen. Der Begriff Funktionale Sicherheit beschreibt den Teil des Systems, welcher von der korrekten Funktionsweise des Sicherheitssystems abhängt. Ein Beispiel hierfür ist ein untertätiges CAS. Der Prozess, welcher abgesichert werden soll, ist der Betrieb der Maschine. Ziel der Absicherung sind die Bergarbeiter, welche sich im direkten Umfeld der Maschine aufhalten. Ein CAS hat zur Aufgabe, die



Maschine sofort in einen (für den Bergmann) sicheren Zustand zu überführen, sobald einer der Bergmänner durch sie gefährdet wird. Falls das CAS seine Funktion nicht mehr ausführen kann, ist die Sicherheit des Prozesses und damit die funktionale Sicherheit der Maschine gefährdet. Funktional sichere CAS sind seit einiger Zeit in das Interesse der Forschung und Entwicklung gerückt. [88], [89]

Ausgangspunkt für die Entwicklung eines funktional sicheren Systems ist die Risikobeurteilung des zu sichernden Prozesses. Die Parameter sind Häufigkeit und Dauer (F), Wahrscheinlichkeit des gefährlichen Ereignisses (W) und Vermeidung (P). Die Bewertung der einzelnen Parameter ist in Tabelle 7.1 beschrieben. Aus diesen drei Parametern kann dann für jede Gefahrensituation die Klasse K gebildet werden:

$$K = F + W + P. \quad (7.7)$$

Diese führt, abhängig von der Schwere der Verletzung durch die Gefahrensituation, zu dem erforderlichen Safety Integrity Level (SIL) (siehe Tabelle 7.2). Wenn man das erforderliche SIL ermittelt hat, muss die Analyse des erreichbaren SIL durchgeführt werden. Hierzu werden Daten über die Zuverlässigkeit der Einzelkomponenten benötigt. Dies stellt in der Praxis eine hohe Hürde dar, da streng genommen alle elektronischen Geräte bis hin zur Bauteilebene quantifiziert und Ausfallwahrscheinlichkeiten berechnet werden müssen. In der Praxis ist dies mit erheblichem Aufwand verbunden. Trotzdem führt streng genommen kein Weg hieran vorbei, sofern ein funktional sicheres System erstellt werden soll.

Ein einfacherer Weg für komplexere elektronische Systeme zu einem funktional sicheren System kann durch die Einbringung von Redundanzen besprochen werden (vgl. 7.2.3). Tabelle 7.3 zeigt den Zusammenhang zwischen der Safe-Failure-Fraction (SFF), der Hardwarefehlertoleranz (HFT) und dem SIL. Ein System, welches SIL-1 erfüllen soll und einen HFT=0 aufweist, benötigt eine sehr zuverlässige Erkennung von Fehlern (zwischen 60% und 90%), um ein genügend hohes SFF realisieren zu können. Diese hohe und zuverlässige Erkennung von Fehlern kann oftmals nicht realisiert werden. Durch die Einbringung von Redundanzen im System kann trotzdem eine hohe Sicherheit erreicht werden.

Es sei wieder das Beispiel des Betonspritzgeräts aus dem vorherigen Abschnitt gewählt. Angenommen, die Positionsbestimmung basierend auf Dreh-/Lineargebern erreicht eine SFF zwischen 60% und 90%. Damit könnte ein Positioniersystem realisiert werden, welches SIL-1 erfüllt. Durch die Erweiterung des Systems durch das UWB-System würde nun eine Redundanz eingebracht. Damit erhöht sich die Toleranz von Fehlfunktionen im Gesamtsystem und es wird ein HFT=1 erreicht. Das

Häufigkeit und Dauer	F > 10 Min.	F < 10 Min.	Wahrscheinlichkeit gef. Ereignis	W	Vermeidung	P
≤ 1 Std.	5	5	häufig	5		
> 1 Std. - ≤ 1 Tag	5	4	wahrscheinlich	4		
> 1 Tag - ≤ 2 Wo.	4	3	möglich	3	unmöglich	5
> 2 Wo. - ≤ 1 Jahr	3	2	selten	2	möglich	3
> 1 Jahr	2	1	vernachlässigbar	1	wahrscheinlich	1

Tabelle 7.1: Parameter zur Risikobeurteilung.

Auswirkungen und Schwere	S	Klasse $K = F + W + P$				
		3-4	5-7	8-10	11-13	14-15
Tod, Verlust eines Auges oder Armes permanent, Verlust von Fingern	4	SIL 2	SIL 2	SIL 2	SIL 3	SIL 3
reversibel, medizinische Behandlung	3			SIL 1	SIL 2	SIL 3
reversibel, Erste Hilfe	2				SIL 1	SIL 2
	1					SIL 1

Tabelle 7.2: Einordnung von Gefahrensituationen in SIL.

heißt, dass ein Systemfehler auftreten darf, bevor die Sicherheit des Gesamtsystems beeinträchtigt wird. Nun wird im Gesamtsystem direkt SIL-2 erreicht, also das nächsthöhere Level, ohne die SFF der Einzelsysteme verbessern zu müssen. Dies stellt eine erhebliche Vereinfachung dar, da die sichere Detektion von Fehlern in einem System durch das System selbst einen großen Aufwand darstellt. Durch das Ausweichen auf parallele, redundante Systeme wird dieser Umstand umgangen.

Safe Failure Fraction SFF	Hardwarefehlertoleranz HFT		
	0	1	2
< 60%	n.E.	SIL 1	SIL 2
60% < SFF ≤ 90%	SIL 1	SIL 2	SIL 3
90% < SFF ≤ 99%	SIL 2	SIL 3	SIL 4
> 99%	SIL 3	SIL 4	SIL 4

Tabelle 7.3: Zusammenhang zwischen der Safe-Failure-Fraction, der Hardwarefehlertoleranz und dem SIL. [90]



7.4 Zündschutz in explosiven Atmosphären

Um das hier vorgestellte System auch in untertägigen Umgebungen wie z.B. dem Kohlenbergbau einsetzen zu können, muss das System für explosionsgefährdete Atmosphären ausgelegt sein. Der folgende Abschnitt gibt einen Überblick über die Notwendigkeit für Explosionsschutz im Allgemeinen und geht auf notwendige Maßnahmen ein, welche für das hier vorgestellte Positionsbestimmungssystem gelten, ein.

7.4.1 Grundlagen des Explosionsschutzes

Der Begriff Schlagwetter- und Explosionsschutz umfasst alle Maßnahmen, welche ergriffen werden, um den Betrieb von elektronischen Betriebsmitteln in Umgebungen, in denen explosive Atmosphären auftreten (können), abzusichern. In bestimmten Anwendungen können Gas-/Luftgemische auftreten, welche eine explosive Atmosphäre bilden: Im untertägigen Kohlenbergbau führt der Methanausbruch während der Gewinnung unter Umständen zu einer solchen Atmosphäre. In anderen Bereichen, wie z.B. in Labors und Prozessstraßen der Chemieindustrie, sind vor allem Wasserstoff-Luftgemische die auftretenden gefährlichen Gemische. Elektrische Betriebsmittel können diese explosiven Atmosphäre entzünden, falls die in gespeicherte elektrische Energie in die Atmosphäre entladen wird. Nach der Entzündung setzt sich eine Kettenreaktion in Gang, welche zur explosionsartigen Entzündung des Methangemisches und damit zu verheerenden Unglücken führen kann. Daher hat insbesondere im untertägigen Kohlenbergbau die Absicherung gegen solche Unglücke eine lange Tradition und einen hohen Stellenwert.

Die Gefahr hängt maßgeblich vom Gas und Häufigkeit des Auftretens des gefährlichen Gemischs unterschieden. Die Mindestzündenergien ausgewählter Gase sind in Tabelle 7.4 angegeben. Diese sind ein Indiz dafür, wie viel Energie aus dem elektrischen System in die Atmosphäre entladen werden muss, um sie zu entzünden. Weiterhin gibt es für die Gase unterschiedliche Zündtemperaturen, welche ebenfalls berücksichtigt werden müssen. Zudem wird eine Anwendung nach der Auftrittswahrscheinlichkeit solcher gefährlichen Atmosphären klassifiziert (siehe Tabelle 7.5). Für den untertägigen Kohlenbergbau ist Zone 2 definiert.

Gas	Chemische Formel	Mindestzündenergie [μWs]
Methan	CH ₄	280
Propan	C ₃ H ₈	250
Benzol	C ₆ H ₆	200
Wasserstoff	H ₂	11

Tabelle 7.4: Mindestzündenergien von Gas-Luft-Gemischen. [91]

Zone	Häufigkeit
0	Explosionsfähige Atmosphäre ist ständig oder langzeitig vorhanden (häufiger als 100h/a).
1	Explosionsfähige Atmosphäre ist gelegentlich vorhanden (1 bis 100h/a).
2	Explosionsfähige Atmosphäre tritt selten und nur kurzzeitig auf (weniger als 1h/a, häufiger als 1h/100a).

Tabelle 7.5: Zoneneinteilung für explosive Atmosphären. [91]

7.4.2 Konstruktive Maßnahmen

Nachdem man Klarheit über die Zone, für welche das System geeignet sein muss, erlangt hat können Zündschutzarten diskutiert werden. Der Zündschutz sorgt dafür, dass auch eine Fehlfunktion des technischen Systems nicht zu einer Entzündung der eventuell explosiven Atmosphäre führen kann. Mögliche Zündschutzarten umfassen: Eigensicherheit, Ölkapselung, Plattenschutzkapselung, Sandkapselung, Überdruckkapselung, Vergußkapselung, erhöhte Sicherheit und druckfeste Kapselung. Im Folgenden wird auf die Eigensicherheit und die druckfeste Kapselung eingegangen, weil diese die sinnvollsten Maßnahmen für das entwickelte Positionsbestimmungssystem darstellen.

7.4.2.1 Eigensicherheit

Die eigensichere Zündschutzart basiert auf der Annahme, dass das elektrische System maximal eine bestimmte Energie abgeben kann. Diese Energie setzt sich zusammen aus den Energiespeichern (Kapazitäten und Induktivitäten) und der Energie, welche aus dem Netzteil des System kontinuierlich nachgeliefert wird. Im Falle einer Fehlfunktion des elektrischen Systems (z.B. eines Kurzschlusses) könnte diese Energie in die Atmosphäre entweichen und diese entzünden. Bei Systemen, welche generell ein



niedriges Energieniveau aufweisen (z.B. Mess- und Regelungssysteme), kann diese Schutzart sinnvoll sein. Als Richtwerte für zulässige Energien können die folgenden Werte dienen (nach [91]):

- Kapazität: $C=10\ \mu\text{F}$, bei $U=10\ \text{V}$, in Methan-Atmosphäre keine Entzündung,
- Ohmsch-Induktiv: $L/R = 417\ \mu\text{s}$, bei $L=100\ \text{mH}$, Versorgungsspannung $U=24\ \text{VDC}$, in Methan-Atmosphäre keine Entzündung und
- Ohmsch: $P=40\ \text{W}$, $L \leq 1\ \text{mH}$, $U=20\ \text{V}$, in Methan-Atmosphäre keine Entzündung.

Ein Vergleich der Richtwerte mit den Leistungsdaten der betrachteten UWB-Systeme wird klar, dass auch für diese Systeme die eigensichere Zündschutzart in Betracht kommt: Das P410 wird mit einer maximalen Leistungsaufnahme von 4,2 W angegeben [82]. Die Betriebsspannung muss mindestens 5,75 V betragen. Genaue Daten über die intern verbauten Kapazitäten verhindern jedoch eine exaktere Aussage über die Machbarkeit einer eigensicheren Variante. Um dies zu beurteilen, muss der Hersteller genaue Bauteillisten und Schaltpläne bereitstellen. Dies ist jedoch ohne Weiteres ausgeschlossen, da diese Dokumentation intellektuelles Eigentum des Herstellers ist und (verständlicherweise) der Geheimhaltung unterliegt.

Das DWM1000 bietet ein noch größeres Potenzial für ein eigensicheres System. Da das System für eine niedrigere Integrationsebene vorgesehen ist, liegen die o.g. Dokumentationen im eigenen Haus vor, da diese dort erstellt werden müssen. Das DWM1000-Modul selbst wird mit einer maximalen Leistungsaufnahme von 0,53 W angegeben; die Versorgungsspannung liegt bei 3,3 V [75]. Auch hier ergibt sich zwar das Problem, dass die exakten Bauteile auf dem Modul nicht öffentlich gemacht sind, jedoch liegen zum Einen die verbauten Kapazitäten auf einem sehr viel niedrigeren Niveau, sodass diese noch vermessen und als eine Gesamtkapazität für das Subsystem DWM1000 angenommen werden können. Zum Anderen könnte auch auf den Einsatz des DW1000-Chips gesetzt werden, welcher die volle Kontrolle über Bauteile und Schaltpläne ermöglicht. Hier ist jedoch der Aufwand abzuschätzen, um ein funktionsfähiges Funk-Frontend in Eigenregie zu erstellen.

7.4.2.2 Druckfeste Kapselung

Falls alle anderen Zündschutzarten nicht ausreichen, kann immer auf eine entsprechende Kapselung des Systems zurückgegriffen werden. Dies sollte jedoch (immer) die letzte der zu erwägenden Möglichkeiten bleiben, da der Aufwand und die Kosten erheblich sind. Das Prinzip dieser Schutzart ist die Einhausung des elektrischen Systems in einem Gehäuse, welches einer Explosion im Inneren standhält und das

Ausbreiten der Explosion nach Außen verhindert. Dies wird über die Einbringung von exakten Spaltmaßen im Gehäuse erreicht, welche dazu führen, dass im Falle einer Explosion im Inneren die Luftgeschwindigkeit im Spalt so groß wird, dass die entzündete Luft gelöscht wird. Das Hauptproblem dieser Schutzart hinsichtlich des UWB-Systems ist, dass das System eine Antenne nutzt und diese durch das Stahlgehäuse abgeschirmt würde. Daher müsste in diesem Fall die Antenne über einen eigensicheren Stromkreis nach Außen geführt und in einem externen (nicht-metallischen) Gehäuse untergebracht werden. Hierbei ist darauf zu achten, dass die dadurch stark vergrößerte Zuleitung zur Antenne entsprechend kalibriert wird (siehe 4.4).



8 Zulassung von UWB-Systemen in Deutschland und der Welt

Normen stellen allgemein anerkannte Regeln und Handlungsweisen des Stands der Technik dar, im Gegensatz zum oft neuartigen und nicht-regulierten Stand der Wissenschaft.

Dieser Satz fasst die oft empfundene Diskrepanz zwischen neuen, innovativen Entwicklungen in Forschung und Wissenschaft und der Realisierung dieser Konzepte in Form von Produkten zusammen. Jedoch ist jede ingenieurwissenschaftliche Erfindung nur insofern eine sinnvolle, als dass sie verwertbar ist. Die Erfindung eines Systems, welches ein Problem um ein Vielfaches besser löst als mit dem Stand der Technik ist nur von akademischem Interesse, wenn dieses System nach gültigem Recht nicht im Markt eingesetzt werden darf. Es ist daher notwendig, sich mit den gesetzlichen Regelungen zur Zulassung einer neuen Erfindung auseinanderzusetzen - auch um frühzeitig entsprechende Maßnahmen treffen zu können, die eine Verwertung vereinfachen könnten. Dieses Kapitel gibt daher einen Überblick über die geltenden Regularien und Normen, welche Beachtung finden müssen, um das hier entwickelte System verwerten zu können.

8.1 Zulassungsrichtlinien in Deutschland und im europäischen Ausland

Um die entscheidenden Normen und Richtlinien einordnen zu können, ist es hilfreich, einen Überblick über die involvierten Institutionen zu gewinnen (Abbildung 8.1). Durch die Mitgliedschaft in der EU hat sich Deutschland bereit erklärt, Staatsaufgaben in Kooperation mit den anderen EU-Mitgliedstaaten zu erarbeiten und umzusetzen (sofern dies möglich ist). Eine gewollte Konsequenz ist die Vereinfachung des EU-Binnenhandels, auch für elektrische Maschinen. Um dies zu erreichen, ist es notwendig ihre Zulassungen und Richtlinien für ihren sicheren Betrieb EU-weit zu regeln. Die EU tut dies mit der *Richtlinie 2006/42/EG* [92] (im Folgenden Maschinenrichtlinie genannt). Diese Richtlinie hat jedoch noch keine unmittelbare Wirkung.



Die Mitgliedstaaten sind vertraglich dazu angehalten, diese Richtlinie binnen einer festgesetzten Frist in nationales Recht umzusetzen. In Deutschland wird die Maschinenrichtlinie unverändert übernommen und findet ihre Umsetzung im deutschen Produktsicherheitsgesetz. Unabhängig zur nationalen Umsetzung wird der Prozess der Konkretisierung auf EU-Ebene angestoßen. Hierbei werden die allgemein formulierten Richtlinien in konkrete (Handlungs-)Anweisungen und Anforderungen ausformuliert. Dieser Prozess wird durch die Institutionen European Committee for Standardization (CEN), European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC) und European Telecommunications Standards Institute (ETSI) geleistet, welche den Auftrag hierzu von der europäischen Kommission erhalten. Diese Institutionen erarbeiten die Normen in Gremien, in welchen sich relevante Vertreter aus Industrie, anderen Ausschüssen und sonstigen Institutionen finden. Die Mitarbeit in diesen Gremien ist freiwillig und prinzipiell für jedermann möglich. Inzwischen werden oftmals auch internationale Standardisierungsgremien in diesen Prozess eingebunden (z.B. die International Organization for Standardization (ISO) oder die International Electrotechnical Commission (IEC)), um eine möglichst einheitliche Behandlung auch auf internationalem Level zu erreichen. Normen, welche hier erarbeitet werden, sind sogenannte harmonisierte EN-Normen (Kennzeichnung durch *EN* im Namen). Jeder EU-Mitgliedsstaat kann dann unabhängig entscheiden, ob er diese harmonisierten Normen übernimmt, oder ob er eigene Normen anwendet. In Deutschland werden die die Maschinenrichtlinie konkretisierenden harmonisierten Normen durch das Deutsche Institut für Normung e.V. (DIN) direkt und ungeändert übernommen (Kennzeichnung ist dann einheitlich *DIN EN*...). [93] [94] [95]

Die Zulassung eines jeden technischen Systems unterliegt der Maschinenrichtlinie und den daraus abgeleiteten Normen. Da diese allgemein gelten, soll an dieser Stelle nur auf die UWB-spezifischen Normen eingegangen werden. Zuständig für die Erstellung der hierfür geltenden Normen ist die ETSI. Entsprechend der vorausgegangenen Darstellungen hat die Europäische Kommission die Richtlinie 2007/131/EG erlassen [96]. Diese Richtlinie wurde inhaltsgleich in nationales Recht umgesetzt und durch die zuständige Behörde (die Bundesnetzagentur) veröffentlicht [97]. Die EU-Richtlinie wurde weiterhin von der ETSI aufgenommen und konkretisiert, was zur Norm *EN 302 065* führte [98]. Das DIN hat diese Normen in Deutschland unter der Bezeichnung *DIN EN 302065-3:2015-01* übernommen. In den aktuellen Richtlinien ist aufgeführt, in welchen Frequenzbändern welche Leistung ausgestrahlt werden darf 8.2 [97].

Weiterhin erlaubt die Zuteilung, dass Funkssysteme mit einer höheren Leistung als in 8.2 angegeben senden dürfen, sofern sie zusätzliche Störungsminderungstechniken

Frequenzbereich in GHz	Maximaler Mittelwert der spektralen Leistungsdichte	Maximaler Spitzenwert der Leistung bezogen auf 50 MHz
	dBm/MHz (EIRP)	dBm/50 MHz (EIRP)
$f \leq 1,6$	-90,0	-50,0
$1,6 < f \leq 2,7$	-85,0	-45,0
$2,7 < f \leq 3,4$	-70,0	-36,0
$3,4 < f \leq 3,8$	-80,0	-40,0
$3,8 < f \leq 4,2$	-70,0	-30,0
$4,2 < f \leq 4,8$	-70,0	-30,0
$4,8 < f \leq 6,0$	-70,0	-30,0
$6,0 < f \leq 8,5$	-41,3	0,0
$8,5 < f \leq 10,6$	-65,0	-25,0
$f > 10,6$	-85,0	-45,0

Abbildung 8.2: Frequenznutzungsparameter für die allgemeine UWB-Nutzung in Deutschland [97].

einsetzen. Insbesondere ist konkret eine solche Störungsminderungstechnik namens „Low Duty Cycle (LDC)“ als anerkannt angegeben. Ein System mit dieser LDC Technik muss sicherstellen, dass der Sendezeitanteil derart begrenzt ist, „dass die Summe aller übertragenen Signale in einer Sekunde weniger als 5 % und in einer Stunden weniger als 0,5 % der Zeit ausmacht und jedes übertragene Signal nicht länger als 5 ms andauert.“ [97] Ist dies gegeben, erhöht sich der zulässige Mittelwert der isotropen spektralen Leistungsdichte auf -41,3 dBm/MHz.

Inzwischen existiert eine neuere Version der Richtlinie 2007/131/EG. Die 2014/702/EU basiert auf dem Auftrag der Europäischen Kommission an die European Conference of Postal and Telecommunications Administration (CEPT) auszuarbeiten, welche nötigen Änderungen an der alten Richtlinie getätigt werden sollten um die UWB-Frequenzen in Zukunft sinnvoller und effizienter nutzen zu können. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind im CEPT Bericht Nr. 14 [99] dokumentiert. Abschnitt 3.4 dieses Berichts drückt klar aus, dass in gewissen Anwendungen und Installationen eine Nicht-Konformität mit den Zulassungsrichtlinien zugelassen wird:

„Equipment using ultra-wideband technology may also be allowed to use the radio spectrum with e.i.r.p. limits other than those set out in the table in point 1 provided that appropriate mitigation techniques other than those set out in the first sub-paragraph are applied with the result that the equipment achieves at least an equivalent level of protection to that provided by the limits in the table set out in point 1. Examples of such application not considered for inclusion in the EC Decision for UWB may be found in industrial machine installations operating equipment with UWB devices or other areas with very limited traffic from people, and/or narrow field of emission resulting from use of directional antennas.“ [99]

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass es nach anfänglichen Schwie-

rigkeiten nun klare EU-Vorgaben für die Nutzung von UWB-Funksystemen seitens der Regulierungsbehörden gibt. Diese Vorgaben werden von den hier vorgestellten UWB-Herstellern berücksichtigt: Der DW1000-Chip von Decawave ist vorzertifiziert und richtet sich nach den geltenden Vorgaben. Timedomain ist auch bestrebt ein EU-Richtlinienkonformes Modul auf den Markt zu bringen. Darüber hinaus gibt es jedoch noch Potential um die UWB-Regulierung für bestimmte Anwendungen mitzubestimmen. Es existieren derzeit keine speziellen Regulierungen für den Bergbau. Da die Systeme, welche hier eingesetzt werden, naturgemäß relativ gut isoliert gegenüber der Öffentlichkeit sind, könnten hier spezielle Regularien erarbeitet werden. Dies kann durch die Mitarbeit in den entsprechenden Gremien (in diesem Fall der ETSI) geschehen.

Es ist darüber hinaus möglich für zeitlich begrenzte Installationen eine Sonderzulassung zu beantragen. Hierfür wird von der Bundesnetzagentur geprüft, ob in den avisierten Örtlichkeiten Störungsfreiheit gewährleistet ist. Sollte diese Prüfung positiv ausfallen, kann eine Sonderzulassung genehmigt werden. Diese Beantragung schlägt mit ca. 150 Euro einmalig und ca. 20 Euro jährlich zu Buche.

8.2 Zulassungsrichtlinien in den USA

Der Normungsprozess in den USA ist durch ähnliche Institutionen wie in Europa geprägt. An dieser Stelle wird jedoch nur auf die effektiven Parameter der UWB-Nutzung in den USA eingegangen. Die Norm zur Nutzung von UWB-Systemen in den USA wird durch die Federal Communications Commission (FCC) erlassen. Die dort zulässige Leistungsdichte für UWB-Systeme ist in Abbildung 8.3 dargestellt.

Die zugeteilten und zulässigen Frequenzbereiche unterscheiden sich maßgeblich von denen in der EU. Der inländische Einsatz von im Ausland gekauften UWB Systemen kann also in keiner Weise generell als zulässig angesehen werden. Bei einem solchen Einsatz bleibt im schlimmsten Fall nur noch die Sonderzulassung, wie sie im vorherigen Abschnitt erläutert wurde.



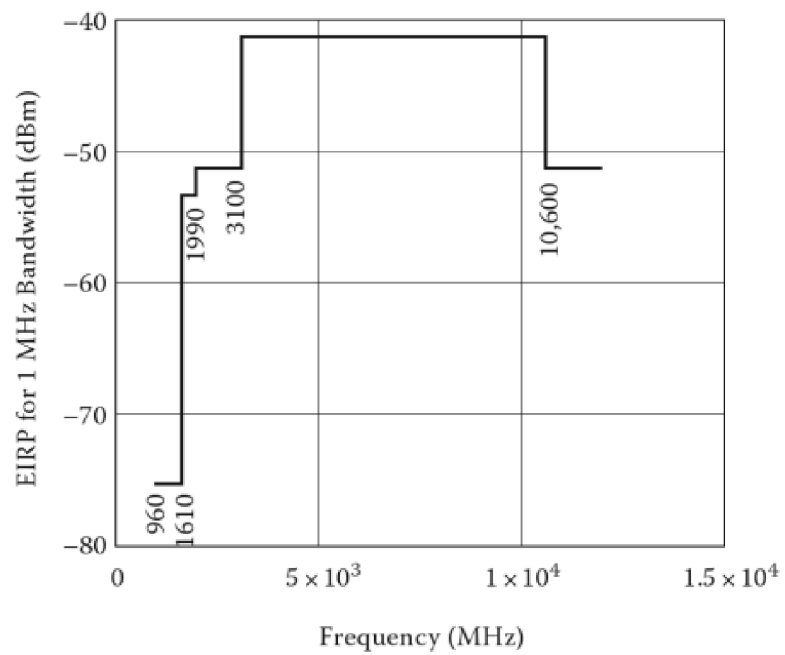


Abbildung 8.3: Frequenznutzungsparameter für die allgemeine UWB-Nutzung in den USA. [100]

9 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit hat die Konzeptionierung und Implementierung eines neuartigen Positioniersystems für den Einsatz im Schwermaschinenbau dargestellt. Es wurden die speziellen Schwierigkeiten aufgeführt, welche in dieser Branche auftreten. Ein Überblick über existierende Technologien inklusive einer Aufstellung verfügbarer Produkten, welche zur Ortung geeignet sind, wurde gegeben. Basierend auf den Anforderungen und existierenden Technologien wurde dargelegt, was die UWB-Technologie von den bisherigen Technologien unterscheidet. Die Vor- und Nachteile wurden identifiziert und erklärt.

Die Konzeptionierung eines neuen Positioniersystems, welches auf der UWB-Technologie fußt, wurde vorgestellt. Anschließend wurden die Details der Implementierung dargestellt, welche zu einer praktischen Nutzung des Systems notwendig sind. Die Laborergebnisse, welche die Leistungsfähigkeit des Systems in der Praxis untermauern wurden dargelegt. Genauigkeiten von wenigen cm im eindimensionalen Fall wurden hier gemessen, was eine sinnvolle Nutzung in praktischen Anwendungen ermöglicht.

Basierend auf diesen Labormessungen wurde das System in relevanten praxisnahen Umgebungen getestet. Im übertägigen Einsatz wurden Messungen an einem Bagger zur 1D-Positionsbestimmung und an einem Absetzer im Tagebau zur 3D-Positionsbestimmung durchgeführt. Das Systemkonzept stellte sich als sinnvoll und zielgerichtet heraus, sodass das System im alltäglichen Betrieb eingesetzt werden kann und über entsprechende Industrie-Schnittstellen mit dem Leitsystem kommuniziert.

Eine Innen-Installation im Kohlenbunker ermöglichte trotz der für Funkssysteme herausfordernden Umgebung die 1D-Positionsbestimmung eines Bunkerentladewagens. Das System wurde auch hier mit geeigneten Schnittstellen in das Leitsystem integriert, und die Messdaten konnten über mehrere Wochen validiert werden. Insbesondere konnte hierbei der Mehrwert gegenüber einem herkömmlichen Lasermesssystem belegt werden.

Im untertägigen Bereich wurden Messungen erfolgreich durchgeführt, womit die Tauglichkeit für den Einsatz in untertägigen Anwendungen gezeigt wurde. 1D- und



2D-Messungen über die Genauigkeit des Systems zeigten, dass das System auch hier für praktische Anwendungen einsetzbar ist. Beispiele für solche Anwendungen (vor allem zu Zwecken des Kollisionsschutzes) wurden entsprechend konzipiert und motiviert.

Die Messungen zeigten insgesamt, dass die Vorteile, die die UWB-Technologie bringt, tatsächlich zu einer hervorragenden Leistung in diesen Umgebungen führt. Der Einsatz dieser Technologie im Schwermaschinenbau birgt erhebliches Potential, welches durch geeignete Weiterentwicklung, Verwertung und Vermarktung erschlossen werden kann.

Ein wichtiger Meilenstein wird in Zukunft auch die Integrierbarkeit des Systems darstellen. In dieser Arbeit wurden zwei UWB-Module vorgestellt, welche unterschiedliche Integrationslevel anbieten. Je nach Anwendung muss entschieden werden, welches System sinnvoller ist. Performance, Kosten und Integrierbarkeit werden hier die entscheidenden Faktoren sein. Die Hersteller beider Systeme haben bisher unabhängige Systeme entwickelt, erkannten jedoch inzwischen potentielle Synergieeffekte zwischen beiden Produktlinien. Daher wurde kürzlich eine Kooperation zwischen Decawave und Timedomain bekannt gegeben [101]. Dies lässt darauf hoffen, dass es womöglich in Zukunft ein System geben wird, welches auf einem Integrationslevel zwischen den bisherigen Systemen liegt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Datenübertragung mit dem UWB-System nur am Rande behandelt. Der Fokus lag auf der Entwicklung eines Positioniersystems. Die Möglichkeit der Datenübertragung rückte im Laufe der Zeit immer mehr in den Fokus, weswegen das Systemkonzept diese Möglichkeit berücksichtigt, jedoch hierzu keine Evaluierung durchgeführt wurde. Nichtsdestotrotz stellt dies einen hochinteressanten Aspekt dar, welcher weiter erforscht werden sollte. Drahtlose Datenübertragungssysteme für den Schwermaschinenbau bergen immer noch großes Optimierungspotential - vor allem, wenn sie mit einem Positioniersystem kombinierbar sind und so ein weiteres System entfallen kann. Basierend auf den Ergebnissen des H2020-Projekts „RealTime-Mining“ könnte ein solches kombiniertes System entwickelt werden. Ausgehend von dem in dem Projekt entwickelten Positioniersystem könnte die Datenübertragung in das System integriert werden. Basierend darauf können noch weitere Aspekte untersucht werden, wie z.B. die Erstellung eines Mesh-Netzwerks bestehend aus UWB-Tags, welche sich selbstständig konfigurieren und austauschen können.

Weiterhin ist die UWB-Technologie ein potentieller Ersatz für aktive RFID-Tags. Der sehr geringe Leistungsbedarf von entsprechend konstruierten UWB-Tags könnte zu

Laufzeiten von mehr als einem Jahr führen. Hiermit könnten Betriebsmittel und auch Bergleute identifiziert und erheblich genauer positioniert werden. Durch die erneute Kombination mit der Positionsbestimmungsfähigkeit dieses Systems wird auch hier ein entsprechender Mehrwert gegenüber derzeitigen Lösungen generiert.

Im Zusammenspiel mit Inertialsensorik lässt sich die Leistungsfähigkeit des Positioniersystems noch weiter steigern. Durch geeignete Sensorfusion lassen sich die Nachteile eines Systems durch die Vorteile des anderen System größtenteils eliminieren. Das volle Potential dieser Kombination wird sich im Rahmen des Forschungsprojekts „RealTime-Mining“ (siehe 6.4) zeigen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die UWB-Technologie noch großes Potential bietet. Die vorliegende Arbeit hat die Nutzbarmachung dieser Technologie für den Schwermaschinenbau thematisiert und an verschiedenen Szenarien erfolgreich bewiesen. Aufbauend auf diesen Ergebnissen bieten sich - wie in diesem Abschnitt beschrieben - vielfältige Anknüpfungspunkte für Weiterentwicklungen, welche auf dem hier entwickelten System basieren.



Akronyme

AM

Amplitudenmodulation. 40

AoA

Angle-of-Arrival. 8

API

Vom Hersteller bereitgestellte Schnittstelle um mit einem Software- oder Hardware-Modul zu kommunizieren. 46

ATEX

Begriff aus der 94/9/EC-Direktive zur Betreibung von Equipment in explosionsgefährdeten Athmosphären (angelehnt an den französischen Titel: Athmosphères Explosibles). 42

CAS

Collision Avoidance System. 25

CEN

European Committee for Standardization. 113

CENELEC

European Committee for Electrotechnical Standardization. 113

CEPT

European Conference of Postal and Telecommunications Administration. 116

DOP

Aus dem Englischen Verwässerung / Verschlechterung der Präzision. Ein Maß für die Verschlechterung der Präzision eines Lokalisierungssystems abhängig von der geometrischen Beschaffenheit des Systems. 18

DSSS

Direct-Sequence Spread-Spectrum. 40

DW1000

Decawave DW1000 ScenSor-Chip. 48

DWM1000

UWB-Kommunikationsmodul basierend auf dem DW1000-Chip, welches alle nötigen Komponenten (inklusive Antenne) beinhaltet. 49

ETSI

European Telecommunications Standards Institute. 113

EVB1000

Evaluations-Board basierend auf dem DW1000-Chip um die prinzipielle Funktionsweise des DW1000-Chips zu evaluieren. 48

- FCC**
Federal Communications Commission. 117
- FM**
Frequenzmodulation. 40
- HF**
Teil einer Schaltung, der hochfrequente Signale überträgt. 51
- HFT**
Hardwarefehleranz. 106
- IC**
Integrierte Schaltung. Zumeist integriert auf Chip-Level. 48
- IEC**
International Electrotechnical Commission. 113
- IR**
Impuls-Radio. 40
- ISM**
Industrial, Scientific and Medical. 28
- ISO**
International Organization for Standardization. 113
- LOS**
Line-of-Sight. 43
- MSHA**
Mine Safety and Health Administration. 25
- Multilateration**
Verfahren, bei dem basierend auf der Kombination mehrerer Entfernungsmessungen die Position eines unbekanntes Objekts bestimmt wird. 16
- NIOSH**
US-Amerikanische, behördliche Institution zuständig für Arbeitssicherheit und -gesundheit. 32
- NLOS**
Non-Line-of-Sight. 43
- P410**
TimeDomain P410 Ranging and Communication Module. 44
- PCB**
Printed-Circuit-Board. 49
- PM**
Phasenmodulation. 40
- RFCS**
Research Fund for Coal and Steel. 34
- RFID**
Radio-Frequency-Identification. 29

ROS

Robot-Operating-System. Ein Meta-Betriebssystem, das eine Umgebung aus Tools, APIs und Software-Bibliotheken bereitstellt, und damit zur Entwicklung von Roboter-ähnlichen Systemen geeignet ist. 55

RSS

Received Signal Strength. 2

RTT

round-trip-time. 11

SDS-TWR

Synchronous-Double-Sided Two-Way-Ranging. 13

SFF

Safe Failure Fraction. Der Anteil an Fehlern, der nicht zu einer Sicherheitsgefährdung führt. 106

SHF

Super-High Frequency. 27

SIL

Safety Integrity Level. 106

SNR

Verhältnis zwischen Signal und Rauschen. 43

TDoA

Time-Difference-of-Arrival. 9

ToA

Time-of-Arrival. 8

ToF

Time-of-Flight. 8

TTL

Transistor-Transistor-Logik. Bezeichnung für eine Schaltungsfamilie, welche Schnittstellen direkt und ohne Spannungsumsetzer zwischen Mikrocontroller-Schaltungen erlaubt. 44

TWR

Two-Way-Ranging. 11

UART

Die Universal Asynchronous Transmitter/Receiver-Schnittstelle stellt eine standardisierte, bidirektionale Schnittstelle zur Kommunikation dar. Sie findet heutzutage hauptsächlich Verwendung in der Embedded-Technik. 48

UHF

Ultra-High Frequency. 27

USB

Standardschnittstelle zur Verbindung von Geräten im Consumer-Electronics-Bereich. 48

UWB

Ultra-Wideband. v

Abbildungsverzeichnis

2.1	Prinzipieller Aufbau einer 1D-Positionsbestimmung.	5
2.2	Funktionsweise des Angle-of-Arrival-Verfahrens.	8
2.3	Funktionsweise des Time-of-Arrival-Verfahrens.	9
2.4	Funktionsweise des Time-Difference-of-Arrival-Verfahrens.	10
2.5	Das Two-Way-Ranging-Verfahren.	11
2.6	Fehler in der Entfernungsmessung beim TWR-Verfahren über die Quarz-Ungenauigkeit.	13
2.7	Synchronous-Double-Sided Two-Way-Ranging-Verfahren.	14
2.8	Fehler in der Entfernungsmessung beim SDSTWR-Verfahren über die Quarz-Ungenauigkeit.	16
2.9	Prinzipskizze der Multilateration.	17
2.10	Prinzipskizze der nicht-idealen Multilateration.	19
2.11	Verschlechterung der Präzision durch den Einfluss der geometrischen Beschaffenheit eines Positioniersystems (DOP).	23
3.1	Genauigkeit der Kollisionsschutz-Systeme aus der NIOSH-Studie. . . .	33
4.1	Suchergebnisse für das Stichwort „UWB“ auf IEEEExplore.	38
4.2	Hype-Cycle.	39
4.3	Ähnlichkeitssatz der Fourier-Transformation.	41
4.4	TimeDomain P410 RCM.	45
4.5	Paketstruktur einer P410-Übertragung.	46
4.6	TimeDomain UWB Broadspec Antenna.	46
4.7	Richtcharakteristik der TimeDomain UWB Broadspec-Antenne in Azimuth-Richtung.	47
4.8	Richtcharakteristik der TimeDomain UWB Broadspec-Antenne in Elevation-Richtung.	47
4.9	Auszug aus dem Decawave-Produktsortiment basierend auf dem DW1000.	49
4.10	Struktur einer DW1000-Übertragung nach dem IEEE802.15.4-Standard. .	50
4.11	Richtcharakteristik der Antenne des Decawave DWM1000-Moduls. . .	51
4.12	Aufbau zur Kalibration UWB-Moduls.	53
4.13	Strukturbild Hardware-Aufbau des Positioniersystems.	57
4.14	ROS-Architektur.	60
4.15	Node-Struktur für das entwickelte Positionsbestimmungssystem. . . .	61
4.16	Wahrscheinlichkeitsdichte der Normalverteilung.	63
5.1	1D-Labormessung mit dem P410-Modul.	66
5.2	Aufnahme der stationären (Labor-)Messung zur 3D-Ortung.	68

5.3	Ergebnis der 3D-(Labor-)Positionsbestimmung mit dem P410-System.	69
5.4	Aufbau der dynamischen 1D-Labormessung.	70
5.5	Ergebnis der dynamischen 3D-(Labor-)Messung bei 6,0 m/s.	70
5.6	Fehler der Entfernungsmessung im Freifeld (Timedomain und Deca-wave).	72
6.1	Messaufbau 1D-Messung Kohlenmischplatz.	77
6.2	Aufbau der 1D-Kohlenmischplatz-Messung.	78
6.3	Auswertung der Baggerposition über der Zeit.	79
6.4	Messrauschen beim Stillstand des Baggers am Kohlenmischplatz. . . .	80
6.5	Aufbau des verwendeten Kohlenbunkers.	81
6.6	Messaufbau der Kohlenbunker-Installation.	82
6.7	Messschrieb aus der Leitwarte während eines Laserausfalls.	83
6.8	Aufbau der Positionsbestimmung für den Anwendungsfall Absetzer. . .	86
6.9	Schematischer Messaufbau zur Positionsbestimmung des Bandschleifenwagens.	86
6.10	Auswertung der Positionsbestimmung des Bands 1 zum Bandschleifenwagen.	88
6.11	Konzept für die untertägige Positionsbestimmung.	90
6.12	Messwagen für die untertägige Ortungsmessung.	91
6.13	Absoluter Fehler des EVB1000 im langen Tunnel.	93
6.14	Häufigkeitsverteilung des EVB1000 im langen Tunnel bei einer Entfernung von ca. 185 m.	94
6.15	Absoluter Fehler des P410 im langen Tunnel bei einer Entfernung von ca. 188 m.	95
6.16	Häufigkeitsverteilung des P410 im langen Tunnel bei einer Entfernung von ca. 188 m.	95
6.17	Trajektorie der untertägigen exakten Ortung im kurvigen Tunnel (P410). .	96
7.1	Ein klassisches Betonspritzgerät.	102
7.2	Zuverlässigkeits-Blockschaltbild der Serienschaltung.	102
7.3	Zuverlässigkeits-Blockschaltbild des 3v4 UWB-Systems.	104
7.4	Zuverlässigkeits-Blockschaltbild des diversitär redundanten Systems. .	105
8.1	Europäisches und nationales Produktsicherheitsrecht.	115
8.2	Frequenznutzungsparameter für die UWB-Nutzung in Deutschland. . .	116
8.3	Frequenznutzungsparameter für die UWB-Nutzung in den USA. . . .	118

Tabellenverzeichnis

2.1	Einordnung der DOP-Werte. [11]	23
3.1	Auszug verfügbarer Produkte für die allgemeine Indoor-Positionsbestimmung.	27
4.1	Bedeutung der ersten Kennziffer der IP-Schutzart (Nach DIN EN 60529).	58
4.2	Bedeutung der zweiten Kennziffer der IP-Schutzart (Nach DIN EN 60529).	59
5.1	Abweichung (in cm) der ermittelten 3D-Position gegenüber der Referenzpositionen.	67
7.1	Parameter zur Risikobeurteilung.	107
7.2	Einordnung von Gefahrensituationen in SIL.	107
7.3	Zusammenhang zwischen der Safe-Failure-Fraction, der Hardwarefehlertoleranz und dem SIL. [90]	107
7.4	Mindestzündenergien von Gas-Luft-Gemischen. [91]	109
7.5	Zoneneinteilung für explosive Atmosphären. [91]	109

Literaturverzeichnis

- [1] SAP ; SAP NEWS (Hrsg.): *Global Mining Leaders and SAP Discuss Digitized Mine of the Future*. <http://news.sap.com/global-mining-leaders-sap-discuss-digitized-mine-future/>.
Version: 2015
- [2] KILIAN, Anine ; ENGINEERINGNEWS (Hrsg.): *Mine of the future will be digital*. http://www.engineeringnews.co.za/article/mine-of-the-future-will-be-digital-2015-08-21/rep_id:4136.
Version: 2015
- [3] GPS WORLD: *Mining Boom Spurs New Positioning Solutions*. <http://gpsworld.com/mining-boom-spurs-new-positioning-solutions/>. Version: 2010
- [4] ACIL ALLEN CONSULTING: *Precise Positioning in the mining sector: An estimate of the Economic and Social Benefits of the user of augmented GNSS in the mining sector*. Juni 2013
- [5] RALSTON, J. C. ; HARGRAVE, C. O. ; HAINSWORTH, D. W.: *Localisation of Mobile Underground Mining Equipment Using Wireless Ethernet*. In: *Industry Applications Conference, Fourtieth IAS Annual Meeting*. 2005
- [6] MAHFOUZ, Mohamed R. ; FATHY, Aly E. ; KUHN, Michael J. ; WANG, Yahzou: *Recent Trends and Advances in UWB Positioning*. In: *IEEE MTT-S International Microwave Workshop on Wireless Sensing, Local Positioning, and RFID*. 2009
- [7] KENNEDY, Gareth A.: *High resilience wireless mesh networking characteristics and safety applications within underground mines*, University of Exeter, Dissertation, 2006
- [8] HACH, Rainer: *Symmetric Double Sided -Two Way Ranging*. Juni 2005
- [9] ULBRICH, Stefan: *Skript Mathematik IV für Elektrotechnik Mathematik III für B. Sc. Informatik*. 2011
- [10] MANSFELD, Werner: *Satellitenortung und Navigation: Grundlagen und Anwendung globaler Satellitennavigationssysteme*. Springer-Verlag, 2013
- [11] DODEL, Hans ; HÄUPLER, Dieter: *Die Satellitennavigation*. Springer, 2010
- [12] ZOGG, Jean-Marie: *Grundlagen: Ungenauigkeit bei der Positionsbestimmung*. In: *NAVI magazin, www.navi-magazin.de* (2008), Nr. 1-2, S. 101
- [13] MSHA: *Proximity Detection Systems for Continous Mining Machines in Underground Coal Mines*. <https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/FR-2015-09-02/pdf/2015-21573.pdf>. Version: 16.03.2015

- [14] RYDE, Julian ; HILLIER, Nick: Performance of laser and radar ranging devices in adverse environmental conditions. In: *Journal of Field Robotics* 26 (2009), Nr. 9, S. 712–727. <http://dx.doi.org/10.1002/rob.20310>. – DOI 10.1002/rob.20310. – ISSN 15564959
- [15] MAUTZ, Rainer: *Indoor Positioning Technologies*. Zürich, ETH Zürich, Habilitation, Februar 2012. <http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:5659/eth-5659-01.pdf>
- [16] HAGISONIC: *StarGazer RTLS*. <http://www.robotshop.com/en/hagisonic-stargazer-localization-system.html>
- [17] TRIMBLE: *S7 Totalstation Datenblatt*. http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-759472/022516-154A-DEU_TrimbleS7_DS_A4_0715_LR.pdf
- [18] LEICA GEOSYSTEMS: *Nova TM50 Total Station*. <http://leica-geosystems.com/products/total-stations/robotic-total-stations/leica-nova-tm50>
- [19] AMBIPLEX: *RTLS-Technologie*. http://www.ambiplex.com/uploads/media/flyer_ambiplex_devinfo_plain2side_01.pdf
- [20] BALAKRISHNAN, H. ; CURTIS, D. ; DEMAINE, E.: *Cricket Localization System Overview*. <http://cricket.csail.mit.edu/#overview>
- [21] NANOTRON: *RTLS product page*. http://nanotron.com/EN/PR_find.php
- [22] EKAHAU: *WiFi Tags, Badges, and Sensors*. <http://www.ekahau.com/real-time-location-system/technology/wi-fi-tags#!tag--sensor-advantages-1>
- [23] INDOORS: *Indoor Navigation Technology*. <http://indoo.rs/technology/>
- [24] INFISOFT: *Indoor Navigation*. <http://www.infsoft.de/produkte/indoor-navigation>
- [25] BECKER MINING SYSTEMS AG ; BECKER MINING SYSTEMS AG (Hrsg.): *UCAS 430 Controller Datasheet*. http://www.za.becker-mining.com/sites/default/files/BMS_controller_UCAS430_web_0.pdf
- [26] BECKER MINING SYSTEMS AG ; BECKER MINING SYSTEMS AG (Hrsg.): *TCT Personnel Cap Lamp Tags Datasheet*. http://www.becker-mining.com/sites/default/files/BMS_TCT%20Personnel%20Cap%20Lamp%20Tags_web.pdf
- [27] SYMEO GMBH: *LPR-2D Datasheet*. http://www.symeo.com/cms/upload/pdf/en/DataSheets/Symeo_Datasheet_LPR-2D.pdf
- [28] INDURAD: *iPosition: Online and real-time Positioning of Material Transfer Points, Tripper Cards, IPCC and mobile moning Machines*. <http://indurad.com/index.php?id=52>
- [29] INDURAD: *iTruck: Collision Avoidance and Productivity Enhancement Solution for Haul Trucks, Light Vehicle and other Mining Verhicles*. <http://indurad.com/index.php?id=46>

- [30] JONES, Mark: *Personnel Proximity Detection for Longwall*. 2015
- [31] SPENCE, Robert ; MININGGLOBAL (Hrsg.): *An inside look at Caterpillar's Minestar technology*. <http://www.miningglobal.com/machinery/1564/An-inside-look-at-Caterpillar%27s-MineStar-technology>. Version: 2015
- [32] LASE INDUSTRIELLE LASERTECHNIK GMBH: *LaseBTL: Bulk Train Loading-station*. <http://www.lase.de/en/products/mining-logistics/waggon-position-emptiness-control-filling-degree-train-loading-station.html>. Version: 24.10.2014
- [33] LASE INDUSTRIELLE LASERTECHNIK GMBH: *LASE 2000D-11x Serie - Datenblatt*. http://www.lase.de/sensoren/lase-2000d-serie/item/download/207_52b2bc0fac7f90ea44246f8dfe517518.html. Version: 07.05.2013
- [34] LASE INDUSTRIELLE LASERTECHNIK GMBH: *LASE 2000D-22x Serie Datenblatt*. http://www.lase.de/sensoren/lase-2000d-serie/item/download/379_232c348399525a3b5f714528f57f89ab.html. Version: 05.09.2014
- [35] LASE INDUSTRIELLE LASERTECHNIK GMBH ; LASE INDUSTRIELLE LASERTECHNIK GMBH (Hrsg.): *LASE 2000D-13x Serie Datenblatt*. http://www.lase.de/sensoren/lase-2000d-serie/item/download/228_1cb5156cd1760c19fedee80e6eec64de.html. Version: 16.05.2013
- [36] LASE INDUSTRIELLE LASERTECHNIK GMBH ; LASE INDUSTRIELLE LASERTECHNIK GMBH (Hrsg.): *LASE 2000T Serie Datenblatt*. www.lase.de/sensoren/lase-2000t-serie/item/download/405_315c5e8627382a3a6c8cc498086c973d.html. Version: 10.09.2014
- [37] WANG, Jinling ; TSUJII, Toshiaki ; RIZOS, Chris ; DAI, Liwen ; MOORE, Michael: GPS and pseudo-satellites integration for precise positioning. In: *Geomatics Research Australasia* (2001), S. 103–117
- [38] LEICA GEOSYSTEMS ; LEICA GEOSYSTEMS (Hrsg.): *Leica Jigsaw Positioning System - Powered by Locata*. <http://mining.leica-geosystems.com/assets/Secure/Brochure/Leica-Jps-LocataAUv1.01single.pdf>. Version: 2011
- [39] RIZOS, Chris: Locata: A Positioning System for Indoor and Outdoor Applications Where GNSS Does Not Work. In: *Proceedings of the 18th Association of Public Authority Surveyors Conference (APAS2013)*. 2013
- [40] RIZOS, Chris ; LI, Binghao: Independent Testing of Locata: A New High Accuracy Indoor Positioning System. In: *ION-GNSS 2011, Portland, Oregon, USA*. 2011
- [41] DJADEL, Mourad ; DESPINS, Charles ; AFFÈS, Sofiène: Narrowband Propagation Characteristics at 2.45 and 18 GHz in Underground Mining Environments. Version: 2002. <http://ieeexplore.ieee.org/ielx5/8454/26646/01188524.pdf?tp=&arnumber=1188524&isnumber=26646>. In: *IEEE Global Telecommunications Conference*. 2002
- [42] ZHANG, Y. P. ; ZHENG, G. X. ; SHENG, J. H.: Radio propagation at 900 MHz in underground coal mines. In: *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*

- on 49 (2001), Nr. 5, 757–762. <http://dx.doi.org/10.1109/8.929630>. – DOI 10.1109/8.929630. – ISSN 0018–926X
- [43] WHITEHOUSE, Kamin ; KARLOF, Chris ; CULLER, David: A practical evaluation of radio signal strength for ranging-based localization. In: *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review* 11 (2007), Nr. 1, 41. <http://dx.doi.org/10.1145/1234822.1234829>. – DOI 10.1145/1234822.1234829. – ISSN 15591662
- [44] PATWARI, Neal ; HERO III, Alfred O. ; PERKINS, Matt ; CORREAL, Neiyer S. ; O’DEA, Robert J.: Relative Location Estimation in Wireless Sensor Networks. In: *IEEE Transactions on Signal Processing* 8 (2003), Nr. 51. http://web.eecs.umich.edu/~hero/Preprints/patwari_tsp02_final.pdf
- [45] CARR, Jacob L. ; JOBES, Christopher C. ; LUTZ, Timothy J. ; YONKEY, Jeffrey A.: NIOSH Field test of second generation Proximity Detection Systems on CM. In: *Mining Engineering Magazine* (March 2015)
- [46] JOBES, Christopher C. ; CARR, Jacob L. ; DUCARME, Joseph ; NATIONAL INSTITUTE FOR OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH (Hrsg.): *Evaluation of an Advanced Proximity Detection System for Continuous Mining Machines*. <http://www.cdc.gov/niosh/mining/UserFiles/works/pdfs/eaap.pdf>. Version: 2012
- [47] BEDFORD, Michael D. ; KENNEDY, Gareth A.: Evaluation of ZigBee (IEEE 802.15.4) Time-of-Flight-Based Distance Measurement for Application in Emergency Underground Navigation. In: *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 60 (2012), Nr. 5, S. 2502–2510. <http://dx.doi.org/10.1109/TAP.2012.2189731>. – DOI 10.1109/TAP.2012.2189731. – ISSN 0018–926X
- [48] REID, D. C. ; HAINSWORTH, D. W. ; RALSTON, J. C. ; MCPHEE, R. J. ; HARGRAVE, C. O. ; CSIRO (Hrsg.): *Inertial Navigation: Enabling Technology for Longwall Mining Automation*
- [49] REID, D. C. ; DUNN, M. T. ; REID, P. B. ; RALSTON, J. C.: A Practical Inertial Navigation Solution for Continuous Miner Automation. In: *2012 Coal Operators Conference*. 2012
- [50] ZINGSHEIM, Jan M.: *Inertiale Navigation für die Rohstoffindustrie: Entwicklung und Konzeptionierung eines Positions- und Lagebestimmungssystems zur weiterführenden Automatisierung von Betriebsmitteln in der untertägigen Rohstoffgewinnung*. Aachen, RWTH Aachen Universität, Dissertationsschrift, 2015
- [51] NEUMANN, Kai ; BERG, Jan ; EICHENTOPF, Britta: FEATUREFACE : an Innovative Collision Avoidance System for the Underground Mining Industry. In: BANDOPADHYAY, Sukumar (Hrsg.): *Application of computers and operations research in the mineral industry*. Englewood, Colo. : Society for Mining Metallurgy & Exploration Inc. (SME), 2015. – ISBN 9780873354172
- [52] EVONIK INDUSTRIES AG: *OPTI-MINE Handbook: Deliverable 8.1b*. http://www.opti-mine.eu/files/opti-mine_handbook.pdf. Version: 2014

- [53] HOHER, Peter A.: *Grundlagen der digitalen informationsübertragung*. [S.l.] : Springer Vieweg, 2013. – ISBN 978–3–8348–1784–6
- [54] FEDERAL COMMUNICATIONS COMMISSION: *Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission Systems: FCC 02-48*. https://apps.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/FCC-02-48A1.pdf
- [55] GARTNER: *Gartner Hype Cycle*. <http://www.gartner.com/technology/research/methodologies/hype-cycle.jsp>. Version: 2015
- [56] WIN, M. Z. ; DARDARI, D. ; MOLISCH, A. F. ; WIESBECK, W. ; JINYUN ZHANG: History and Applications of UWB. In: *Proceedings of the IEEE 97* (2009), Nr. 2, S. 198–204. <http://dx.doi.org/10.1109/JPROC.2008.2008762>. – DOI 10.1109/JPROC.2008.2008762. – ISSN 0018–9219
- [57] TIMEDOMAIN: *PulsON® Ranging & Communications: Part Two: UWB Definition and Advantages*. <http://www.timedomain.com/wp/wp-content/uploads/2015/11/320-0291C-Part-Two-UWB-Definition-Advantages.pdf>. Version: Juni 2012
- [58] LSI CORPORATION ; HEWLETT-PACKARD COMPANY ; INTEL CORPORATION ; MICROSOFT CORPORATION ; NEC CORPORATION ; ST-ERICSSON ; SAMSUNG ELECTRONICS CO. LTD.: *Wireless Universal Serial Bus Specification*. Rev. 1.1
- [59] GHAVAMI, Mohammad ; MICHAEL, Lachlan B. ; KOHNO, Ryuji: *Ultra wideband signals and systems in communication engineering*. Chichester : Wiley, 2004 <http://dx.doi.org/10.1002/0470867531>. – ISBN 9780470867518
- [60] AMERICAN BIOMEDICAL GROUP: *Livestock Tracking*. <http://www.americanbiomedicalgroup.com/case-studies/livestock-tracking>
- [61] HUSETH, Steve ; DEWBERRY, Brandon ; MCCROSKEY, Robert: Pulsed-RF Ultra-wideband Ranging for the GLANSER GPS-denied Emergency Responder Navigation System. Version: 2010. <http://www.timedomain.com/white-papers/ION%20ITM%20-%20UWB%20Ranging%20for%20Emergency%20Responders.pdf>. In: ION ITM. 2010
- [62] CHEHRI, A. ; FORTIER, P.: Error Performance of Pulse-Based Ultra-Wideband Systems in Underground Mines. In: *IEEE International Conference on Communications Workshop (ICC)*. 2014
- [63] CHUNMING, Wu: The Research of Coal Mine Location Technology Based on the Ultra-wideband Wireless Sensor Networks. In: *International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*. 2010
- [64] EL KHALED, Mohammed ; FORTIER, Paul ; KANDIL, Nahi ; AMMARI, Mohamed L.: On the Evaluation of UWB Channel Capacity in an Underground Mine. In: *13th Mediterranean Microwave Symposium (MMS)*. 2013
- [65] NEUMANN, Kai ; NEUHAUS, Peter ; NIENHAUS, Karl: Ultra-Breitband Technologie für den Rohstoffsektor. Version: 2012. <http://publications.rwth-aachen.de/record/459856>. In: *Aachener Kolloquium für Instandhaltung Diagnose und Anlagenüberwachung (AKIDA) Bd. 81*. 2012

- [66] COULIBALY, Yacouba ; GILLES, Delisle ; NADIR, Hakem ; DODJI, Akakpo: Experimental Characterization of the UWB Channel for an Underground Mining Vehicle. In: *7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2013. – ISBN 978-1-4673-2187-7
- [67] MABROUK, Ismail B. ; TALBI, Larbi: MIMO-UWB Channel Characterization Within an Underground Mine Gallery. In: *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2012
- [68] MOUTAIROU, Manani: Experimental characterization of the Underground UWB channel. In: *7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2013. – ISBN 978-1-4673-2187-7
- [69] NKAKANOU, Bertrand ; DELISLE, G. Y.: Experimental Evaluation of the Ultra-Wideband Propagation Channel in an Underground Mine. In: *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)*. 2011, S. 2781–2784
- [70] NKAKANOU, Bertrand ; HAKEM, Nadir: Evaluation of Ricean K-factor of an Ultra-Wideband channel in an Underground Mine. In: *Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), IEEE*. 2012
- [71] ZHOU, Chenming ; NATIONAL INSTITUTE FOR OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH, PITTSBURGH, PA, 15236, USA (Hrsg.): *Physics-Based Ultra-Wideband Channel Modeling for Tunnel_Mining Environments*
- [72] TIMEDOMAIN: *PulsON® Ranging & Communications: Part Three: Two-Way Time-of-Flight (TW-TOF) Ranging*. <http://www.timedomain.com/wp/wp-content/uploads/2015/11/320-0292C-Part-Three-TOF-Ranging.pdf>. Version: 2012
- [73] TIMEDOMAIN: *Broadspec UWB Antenna Specification*. http://www.timedomain.com/datasheets/TD_Broadspec_Antenna.pdf. Version: 2011
- [74] DECAWAVE: *DW1000 Datasheet*. 2014
- [75] DECAWAVE: *DWM1000 Datasheet*. 2015
- [76] DECAWAVE: *DW1000 User Manual*
- [77] DECAWAVE: *Sources of error in Two-Way Ranging (TWR) Schemes (Application Note 011)*. 2014
- [78] DECAWAVE: *Antenna Delay Calibration of DW1000-Based Products and Systems (Application Note 014)*. 2014
- [79] DIN: *DIN EN 60529:2014-09 Schutzarten durch Gehäuse*. 2014
- [80] DIN: *DIN 40 050-9:1993-05 Straßenfahrzeuge; IP-Schutzarten; Schutz gegen Fremdkörper, Wasser und Berühren; Elektrische Ausrüstung*
- [81] ISO: *ISO 20653:2013 Road vehicles – Degrees of protection*. 2013
- [82] TIMEDOMAIN: *PulsOn P410 Datasheet*. 2012
- [83] DELFT, TU ; REALTIME MINING CONSORTIUM: *Realtime Mining Project Homepage*. <http://www.realtime-mining.eu/>

- [84] VDI/VDE: *VDI/VDE 2180 Blatt 1: Sicherung von Anlagen der Verfahrenstechnik mit Mitteln der Prozessleittechnik (PLT) - Einführung, Begriffe, Konzeption*. April 2007
- [85] BINDEL, Thomas ; HOFMANN, Dieter: *Projektierung von Automatisierungsanlagen*. Wiesbaden : Vieweg+Teubner, 2009. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-9321-5>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-9321-5>. – ISBN 978-3-8348-0386-3
- [86] REUTHER, Ernst-Ulrich: *Lehrbuch der Bergbaukunde*. 11. Essen : Glückauf GmbH, 1989. – ISBN 3-7739-0493-2
- [87] MEYNA, Arno ; PAULI, Bernhard: *Taschenbuch der Zuverlässigkeitstechnik: Quantitative Bewertungsverfahren*. 2., überarb. und erw. Aufl. München : Hanser, 2010 (Praxisreihe Qualitätswissen). – ISBN 9783446419667
- [88] SIFFERLINGER, Nikolaus A.: Proximity Detection – Schutzeinrichtung für Gefahrenzonen im Untertageberg- und Tunnelbau: Stand der Technik und Notwendigkeiten der Weiterentwicklung. In: *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte* (2016). <http://dx.doi.org/10.1007/s00501-016-0456-8>. – DOI 10.1007/s00501-016-0456-8. – ISSN 0005-8912
- [89] BALLMANN ; LEHNER ; SCHOLZE: Funktionale Sicherheit für die elektrischen Steuerungen von Braunkohleförderanlagen. In: *World of Mining - Surface & Underground* (2013). – ISSN 1613-2408
- [90] REIF, Konrad: Sicherheitsaspekte und funktionale Sicherheit. Version: 2012. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-8658-3_{_}9. In: REIF, Konrad (Hrsg.): *Automobilelektronik*. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2012 (Studium). – DOI 10.1007/978-3-8348-8658-3_9. – ISBN 978-3-8348-1498-2, S. 251-282
- [91] GROH, Heinrich: *Schlagwetter- und Explosionsschutz*. Essen : Glückauf GmbH, 1986. – ISBN 3-7739-0474-6
- [92] EUROPÄISCHES PARLAMENT ; RAT DER EUROPÄISCHEN UNION: *Richtlinie 2006/42/EG über Maschinen zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG: 2006/42/EG*. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:157:0024:0086:de:PDF>. Version: 9.6.2006
- [93] CENELEC: *About CENELEC - Who we are - European partners*. <http://www.cenelec.eu/aboutcenelec/whoweare/europeanstandardsorganizations/index.html>. Version: 2016
- [94] CENELEC: *ISO & IEC - CEN-CENELEC*. <http://www.cencenelec.eu/intcoop/StandardizationOrg/Pages/default.aspx>. Version: 2016
- [95] NEUDÖRFER, Alfred: *Konstruieren sicherheitsgerechter Produkte*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2014. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-45447-9>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-45447-9>. – ISBN 978-3-642-45446-2

- [96] EUROPÄISCHE KOMMISSION: *Gestattung der harmonisierten Funkfrequenznutzung für Ultrabreitbandgeräte in der Gemeinschaft: 2007/131/EG*
- [97] BUNDESNETZAGENTUR: *Allgemeinzuteilung UWB*. https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/Allgemeinzuteilungen/2010_09_UWB_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=4. Version: 2010
- [98] ETSI: *Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Short Range Devices (SRD) using Ultra Wide Band technology (UWB) for communications purposes; Harmonized EN covering the essential requirements of article 3.2 of the R&TTE Directive*. https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302000_302099/302065/01.02.01_30/en_302065v010201v.pdf. Version: V1.2.1, Juli 2010
- [99] ECC, CEPT: *CEPT Report 45*. 21 June 2013
- [100] TAYLOR, James D.: *Ultrawideband radar: Applications and design*. Boca Raton : CRC Press, 2012. – ISBN 9781420089868
- [101] TIMEDOMAIN ; TIMEDOMAIN (Hrsg.): *Decawave and Time Domain Join Forces to Accelerate Micro-Location Market Adoption*. <http://finance.yahoo.com/news/decawave-time-domain-join-forces-140000686.html>. Version: 2015

Zusammenfassung

Die immer weiter steigenden Anforderungen an die Automatisierung stellen auch im Schwermaschinenbau immer neue Fragen an die Sensortechnik. Bedingt durch die immer leistungsfähigeren Computersysteme und deren proportional steigende Fähigkeit, Daten zu verarbeiten und zu aggregieren, ist die Automatisierung der Betriebsmittel im Bergbau seit den 1990er Jahren das Fernziel.

Angelehnt an die Entwicklung der führenden Industrienationen in Richtung Industrie 4.0 haben auch der Bergbau und die Schwerindustrie das Potential dieser Vision entdeckt. Die Digitalisierung der Mine ist für viele Unternehmen im Bergbau das große Thema der Zukunft.

Diese Digitalisierung ist offensichtlich vielschichtig, wie man an den vielen unterschiedlichen und unabhängigen Prozessen in einer modernen Mine erkennen kann: angefangen bei der Gewinnung, dem Transport und der Analyse des Materials, der Aufbereitung, der Qualitätssicherung, der Verladung und parallel zu allem dem wiederholten Ablegen und Aufnehmen von Material. Dabei ist die Erfassung der Umgebung der zu automatisierenden Maschinen ein Kernpunkt für die Automatisierung von mobilen Betriebsmitteln. Dies führt unweigerlich zu der Frage der Positionsbestimmung.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein neuartiges Positioniersystem vorgestellt, welches auf der UWB-Technologie basiert. Die Vorteile eines solchen Systems vermögen viele Probleme der zurzeit existierenden Systeme zu lösen.

Die Grundlagen der funkbasierten Positionsbestimmung, welche zum Verständnis der Positionsbestimmung notwendig sind, werden erläutert. Anschließend wird der aktuelle Stand der Technik sowie die Vor- und Nachteile der entsprechenden Systeme aufgezeigt. Darüber hinaus wird auch der Stand der Forschung beschrieben. Nach dieser Grundlagenanalyse wird die UWB-Funktechnologie und die geleistete Entwicklungsarbeit für das neue Positionsbestimmungssystem vorgestellt. Testmessungen, mit welchen die Leistungsfähigkeit des Systems getestet wird, werden dargestellt und beschrieben bevor auf geleistete Feldinstallationen in realen Applikationen eingegangen wird. Dabei wird Aufschluss über die möglichen Einsatzszenarien des entwickelten Systems gegeben. Anschließend werden Fragestellungen der (Prozess-)Sicherheit erörtert und aufgezeigt, wo das neue System in diesem Kontext einen Mehrwert darstellen kann. Ebenso wird ein Überblick über die Zulassung von UWB-Systemen in Deutschland, der EU und den USA gegeben. Dieser Überblick dient vor allem der Identifizierung von notwendigen Voraussetzungen, um das Positionsbestimmungssystem vermarkten zu können. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick auf kommende Entwicklungen ab.

Abstract

The rising demands for automation systems continuously pose new challenges on the sensor systems. Due to the increasing capabilities of computer systems and their proportionally rising ability to process and aggregate data, the automation of manufacturing equipment is the long term goal since the 1990's.

Based on the developments of the industrial nations regarding Industry 4.0, the mining and heavy machinery industry have realized the potential of this vision. The digitization of the mine is the big subject of the future for many companies.

This digitization is obviously multilayered, as one can immediately see from the many different and independent tasks in a modern mine: beginning with the winning, the transport and analysis of the material, the processing, the quality control, the loading and in parallel to all these tasks the repeated stacking and reclaiming of material. However, a central aspect of this automation is the knowledge of the surroundings of the machines to be automated. This inevitably leads to the task of mobile machinery positioning.

In this thesis, a new positioning system, based on the UWB-Technology, is presented. The advantages of such a system can overcome several drawbacks of existing positioning systems in the industry.

The basics of radio-based positioning, which are necessary for the understanding of positioning systems, are explained. The current state of the art of positioning systems is outlined and advantages and disadvantages are discussed. Furthermore, the state of art in research is outlined. After this, the basics of the UWB-Technology are explained and the development of the new positioning system is described. Several test measurements are shown in which the performance of the system is being tested and relevant installations of the system in real applications are described. Possible use-cases of the developed system are created. Improvements regarding (process) safety are described in which the new system can deliver an added value. Furthermore, an overview over the approval process of such a radio system in Germany, the EU and the USA is given, in order to help with the commercialization of this system. The thesis ends with a summary and an outlook on upcoming future developments.

Schriftenreihe des Instituts für Maschinentechnik der Rohstoffindustrie

ABAR Aachener Beiträge zur Angewandten Rechnertechnik

- Band 1 Weidemann J. (1992).
Rechnerunterstützte Maschinenüberwachung als Instrument der vorausschauenden Instandhaltung in Walzwerken am Beispiel von Profilwalzgerüsten; ISBN 3-86073-051-7
- Band 2 Cerv, H. (1992).
Softwarekonzept zur Analyse und echtzeitfähigen Simulation des dynamischen Verhaltens elektromechanisch gekoppelter Antriebe; ISBN 3-86073-058-4
- Band 3 Ruhnau, S. (1992).
Automatisierung des Darstellungsprozesses bei der Variantenkonstruktion von Gewindebohrwerkzeugen unter Verwendung einer graphischen Programmiersprache am Beispiel eines mittelständischen Zulieferunternehmens der Montanindustrie; ISBN 3-86073-067-3
- Band 4 Schniering, B. (1993).
Entwicklung und Umsetzung einer praxisorientierten CIM-Strategie als Informationssystem für kleine Unternehmen der Präzisionswerkzeugindustrie am Beispiel eines indirekten Zulieferunternehmens der Montanindustrie; ISBN 3-86073-153-X
- Band 5 Streichfuss, M. (1993).
Maschinendiagnose an dieselgetriebenen Transportfahrzeugen im deutschen Steinkohlenbergbau; ISBN 3-86073-154-8
- Band 6 Friedhelm, K. (1993).
Konzeption eines Informationssystems für bergmännische und markscheiderische Planung und Dokumentation; ISBN 3-86073-166-3
- Band 7 Borstell, D. (1993).
Entwicklung eines Softwarekonzeptes für die rechnergestützte maschinentechnische Detailplanung im deutschen Steinkohlenbergbau; ISBN 3-86073-163-7
- Band 8 Linnartz, A. (1993).
Integration von Zustandsdiagnose u. Instandhaltungsplanung, -steuerung und -analyse für dieselgetriebene Transportfahrzeuge im deutschen Steinkohlenbergbau; ISBN 3-86073-290-0
- Band 9 Müller, T. (1994).
Zustandsüberwachung und Verfügbarkeitsprognose in Großanlagen der Stahlindustrie; ISBN 3-86073-291-9

- Band 10 Kessler, H.-W. (1994).
Entwicklung und Untersuchung eines Diagnosesystems zur Wälzlagerüberwachung hydrodynamischer Getriebe; ISBN 3-86073-292-7
- Band 11 Peschers, H. (1994).
Funktionalität und Aufbau eines Leitsystems zur Verbesserung der Materiallogistik von Steinkohlenbergwerken; ISBN 3-86073-293-5
- Band 12 Dumoulin, L. (1995).
Die berührungslose, digitale Messung von Drehmoment und Drehzahl; ISBN 3-86073-294-3
- Band 13 Broderius, T. (1995).
Konzeption eines objektbasierten Programmsystems zur markscheiderischen Bearbeitung und Abbauplanung plattenförmiger Lagerstätten; ISBN 3-86073-295-1
- Band 14 Geropp, B. (1995).
Schwingungsdiagnose an Wälzlagern mit Hilfe der Hüllkurvenanalyse; ISBN 3-86073-296-X
- Band 15 Plaster, A. (1996).
Weiterentwicklung des wettertechnischen CAE-Arbeitsplatzes für den deutschen Steinkohlenbergbau; ISBN 3-86073-297-8
- Band 16 Ahrens, M. (1996).
Entwicklung eines Konzeptes zur Auslegung und zeitoptimalen Berechnung metallischer Zylinderkopfdichtungen mit Hilfe der Finiten Elemente Methode; ISBN 3-86073-298-6
- Band 17 Zhang, M. (1996).
Messstellenreduktion an elektromechanischen Antriebssträngen mittels prozessgeführter digitaler Simulation - ein Beitrag zur Maschinenüberwachung und vorausschauenden Instandhaltung; ISBN 3-86073-299-4
- Band 18 Mackel, J. (1996).
Die anwendungsorientierte Elastizitätsberechnung von Walzgerüsten unterschiedlicher Bauart; ISBN 3-86073-530-6
- Band 19 Seeliger, A. (1996).
AKIDA - Aachener Kolloquium für Instandhaltung, Diagnose und Anlagenüberwachung - Tagungsband des Kolloquiums vom 30.-31. Mai 1996 in Aachen; ISBN 3-86073-531-4
- Band 20 Staniullo, H.-J. (1996).
Ein Beitrag zur Entwicklung eines graphikorientierten Informationssystems für die maschinentechnische Betriebsmitteleinsatzplanung im deutschen Steinkohlenbergbau; ISBN 3-86073-532-2
- Band 21 Tao, X. (1997).
Entwicklung eines Berechnungsmodells zur Ermittlung des Brennraumdruckverlaufs aus der Winkelgeschwindigkeit der Kurbelwelle; ISBN 3-86073-533-0

-
- Band 22 Petit, E. (1997).
Entwicklung eines neuen Verfahrens zur Nassaufbereitung von Bauschutt;
ISBN 3-86073-534-9
- Band 23 Levin, C. (1997).
Konzeption und Realisierung eines rechnergestützten Planungs- und Informationssystems für die Projektplanung im deutschen Steinkohlenbergbau; ISBN 3-86073-535-7
- Band 24 Kaub, R. (1997).
Konzeption und Realisierung eines Informationssystems zur Dokumentation und Vorhersage der Ausgasung im deutschen Steinkohlenbergbau; ISBN 3-86073-536-5
- Band 25 Schumacher, T. (1998).
Konzeption und Entwicklung eines integrierten maschinentechnischen Planungs- und Informationssystems für Rohstoffgewinnungsbetriebe; ISBN 3-86073-537-3
- Band 26 Rensmann, F. (1998).
Entwicklung einer kleinbauenden Gruben-Diesellokomotive mit optimiertem hydraulischen Antriebssystem unter Berücksichtigung der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen im deutschen Steinkohlenbergbau; ISBN 3-86073-538-1
- Band 27 Asch, A. (1998).
Technische Diagnose am stoßaufgeladenen Dieselmotor mit Hilfe leistungskorrelierter Meßgrößen; ISBN 3-86073-539-X
- Band 28 Koch, S. (1998).
Schwingungssimulation industrieller Antriebe mit Drehfeldmaschinen großer Leistung; ISBN 3-86073-700-7
- Band 29 Wischnewski, R. (1998).
Entwicklung eines modularen, wissensbasierten Systems zur Diagnose von dieselgetriebenen Transportfahrzeugen im Deutschen Steinkohlenbergbau; ISBN 3-86073-701-5
- Band 30 Seeliger, A. (1998).
AKIDA - 2. Aachener Kolloquium für Instandhaltung, Diagnose und Anlagenüberwachung - Tagungsband des Kolloquiums vom 3.-4. Juni 1998 in Aachen;
ISBN 3-86073-531-4
- Band 31 Burgwinkel, P. (1998).
Das Transportleitsystem TLS - ein zentrales Planungs-, Steuerungs- und Überwachungssystem zur Verbesserung der Materiallogistik von Steinkohlenbergwerken;
ISBN 3-86073-703-1
- Band 32 Lange, C. (1998).
Die Entwicklung eines Planungs- und Informationssystems für die bergmännische Planung im deutschen Steinkohlenbergbau; ISBN 3-86073-704-X
- Band 33 Tao, X. (1997).
Konzeption einer Regelung zur automatischen Kohleninjektion in Drehstromlichtbogenöfen; ISBN 3-86073-705-8

- Band 34 Georges, D. (1999).
Konzeption, Entwicklung und Einsatz eines Überwachungssystems zur Erkennung und Vermeidung von qualitätsmindernden Störschwingungen an Kaltwalzgerüsten; ISBN 3-86073-706-6
- Band 35 Lorbach, J. (1999).
Konzeption und Implementierung eines objekt-orientierten Datenmodells zur integrierten Nutzung von Prozessdaten für den Bereich Wettertechnik; ISBN 3-86073-707-4
- Band 36 Reimers, J. (1999).
Konzeption eines Rohrleitungsplanungssystems für den deutschen Steinkohlenbergbau; ISBN 3-86073-708-2
- Band 37 Arefzadeh, S. (1999).
Klassifizierung der Belastung von Walzanlagen mittels Softcomputing-Methoden als Grundlage zur Stichplan- und Restlebensdaueroptimierung; ISBN 3-86073-709-0
- Band 38 Bauer, B. (2000).
Körperschallanalyse von Verzahnungen im Rahmen der zustandsorientierten Instandhaltung; ISBN 3-86073-670-1
- Band 39 Baumann, S. (2000).
Entwicklung eines Diagnosesystems für hydrostatische Antriebe von dieselgetriebenen Transportfahrzeugen im deutschen Steinkohlenbergbau; ISBN 3-86073-671-X
- Band 40 Mandelartz, J. (2000).
Der Sekundäraluminium-Stoffstrom in Deutschland unter transporttechnischen und logistischen Gesichtspunkten; ISBN 3-86073-672-8
- Band 41 Schneider, S. (2000).
Methode zur Zustandsüberwachung von Kreuzgelenkwellen in den Hauptantrieben von Walzgerüsten; ISBN 3-86073-673-6
- Band 42 Quacken, G. (2000).
Bestimmung von produktspezifischen, störungsbedingten Qualitätskosten bei der Maschinendiagnose; ISBN 3-86073-674-4
- Band 43 Türk, M. (2001).
Optimierung des Walzprozesses und der Anlagenauslastung durch moderne Diagnoseverfahren und vernetzte Überwachungssysteme; ISBN 3-86073-675-2
- Band 44 Teschers, R. (2001).
Konzeption und Entwicklung eines Gesamtinformationssystems in einem interdisziplinären Forschungsprogramm am Beispiel eines Arbeitsbereichs; ISBN 3-86073-676-0
- Band 45 Shan, J. (2001).
Zustandsdiagnose von Planetengetrieben bei stationärem und instationärem Betrieb mit Hilfe der Schwingungsanalyse; ISBN 3-86073-677-9
- Band 46 Seeliger, A., Burgwinkel, P. (2002).
AKIDA - 4. Aachener Kolloquium für Instandhaltung, Diagnose und Anlagenüberwachung - Tagungsband des Kolloquiums vom 6.-7. November 2002 in Aachen; ISBN 3-86073-677-9

-
- Band 47 Lorbach, J. (1999).
Entwicklung und Erprobung eines neuartigen integrierten Informations-,
Kommunikations- und Automatisierungssystems für den Untertagebau;
ISBN 3-86073-679-5
- Band 48 Nahrath, T. (2003).
Untersuchung zur Erfassung des Säulendurchmessers bei der Düsenstrahlinjektion zur
Baugrundfestigung; ISBN 3-89653-981-7
- Band 49 Heim, G. K. (2003).
Grenzen und Möglichkeiten einer EDV-Unterstützung gruppenbezogener Planungsar-
beit am Beispiel bergbaulicher Produktionsbetriebe; ISBN 3-86130-210-1
- Band 50 Vollmer, A. (2003).
Technische und organisatorische Lösungen zur Einführung von
Instandhaltungsplanungs- und -steuerungssystemen; ISBN 3-86130-192-X
- Band 51 Markhöfer, J. (2003).
Konzeption und Realisierung eines modellgestützten Instrumentariums zur Optimierung
der Transportlogistik für den primären und sekundären Kupferstoffstrom;
ISBN 3-86130-196-2
- Band 52 Hoppe, H. (2003).
Konzeption und Entwicklung eines technischen Berichtsystems zur weltweiten Anlagen-
überwachung am Beispiel von Gutbett-Walzenmühlen; ISBN 3-86130-211-X
- Band 53 Weyres, S. (2003).
Mobile Computing in der Instandhaltung ? Realisierung medienbruchfreier Arbeitsab-
läufe; ISBN 3-86130-212-8
- Band 54 Schaaf, C. (2003).
Entwicklung eines Reportgenerators zur prozessoptimierten Messsignalauswertung an
Walzanlagen; ISBN3-86130-213-6
- Band 55 Reitz, K. (2004).
Betrachtung der Körperschallemission von Wälzlagern zur Verfeinerung der Zustands-
diagnose; ISBN 3-86130-214-4
- Band 56 Gantevoort, T. (2004).
Integration der Körperschalldiagnose in das kommunikations- und informationstechni-
sche System des deutschen Untertagebergbaus; ISBN 3-86130-215-2
- Band 57 Janser, S. (2004).
Modellierung einer Redistributionslogistik metallhaltiger Gebrauchsgüter am Beispiel
von Elektronikaltgeräten; ISBN 3-86130-216-0
- Band 58 Seeliger, A., Burgwinkel, P. (2004).
AKIDA - 5. Aachener Kolloquium für Instandhaltung, Diagnose und Anlagenüberwa-
chung - Tagungsband des Kolloquiums vom 9.-10. November 2004; ISBN 3-86130-217-9
- Band 59 Schumacher, G. (2004).
Entwicklung und Erprobung eines nassmechanischen Bauschuttsortierers;
ISBN3-86130-218-7

- Band 60 Küpper, T. M. E. (2005).
Konzeption und Entwicklung eines intranetbasierten Informationssystems für den deutschen Steinkohlenbergbau; ISBN 3-86130-219-5
- Band 61 Aguilar, C. A. (2005).
Konzeption und Implementierung einer komponentenbasierten Softwareentwicklungsplattform für raumbezogene internetfähige Informationssysteme; ISBN 3-86130-220-9

ASRE Aachener Schriften zur Rohstoff- und Entsorgungstechnik

- Band 62 Balke, A. (2006).
Lebenszyklusrechnung von IPS-Systemen in der Auswahl-, Einführungs- und Betriebsphase; ISBN-10: 3-9810344-2-2; ISBN-13: 978-3-9810344-2-4
- Band 63 Seeliger, A., Burgwinkel, P. (2006).
AKIDA - 6. Aachener Kolloquium für Instandhaltung, Diagnose und Anlagenüberwachung - Tagungsband des Kolloquiums vom 14.-15. November 2006 in Aachen; ISBN-10: 3-9810344-3-0; ISBN-13: 978-3-9810344-3-1
- Band 64 Charlier, F. (2006).
Neuentwicklung eines schlagwettergeschützten Dieselmotors der Leistungsklasse bis 100kW mit Abgasturbolader; ISBN-10: 3-9810344-4-9; ISBN-13: 978-3-9810344-4-8
- Band 65 Bencze, A. (2007).
Entwicklung eines miniaturisierten Drehmomentmesssystems - μ -ETC; ISBN: 978-3-9810344-5-5
- Band 66 Brümmer, G. (2008).
Konzeption, Entwicklung und Einführung eines grafikbasierten Qualitätssicherungssystems für den mobilen Einsatz; ISBN: 978-3-9810344-7-9
- Band 67 Steinhilber, C. (2008).
Konzept zur Überwachung elektronischer Komponenten in Windenergieanlagen mit Hilfe konditionierter Simulation und begleitender Messung; ISBN: 978-3-9810344-9-3
- Band 68 Meßner, A. (2008).
Verfahren zur Schadensdetektion bei langsam oszillierenden Kreuzgelenkwellenlagerungen in Walzwerksantrieben; ISBN: 978-3-941277-00-7
- Band 69 Lachmann, J. M. (2008).
Entwicklung eines simulationsgestützten Condition-Monitoring-Systems zur Onlineüberwachung des mechanischen Antriebsstranges von Multimegawattwindenergieanlagen; ISBN: 978-3-941277-01-4
- Band 70 Seeliger, A., Burgwinkel, P. (2008).
AKIDA - 7. Aachener Kolloquium für Instandhaltung, Diagnose und Anlagenüberwachung - Tagungsband des Kolloquiums vom 18.-19. November 2008 in Aachen; ISBN: 978-3-941277-02-1

- Band 71 Buttgerit D. A. (2009).
Konzeption und Entwicklung eines WLAN-basierten Kommunikations- und Informationssystems für den deutschen Steinkohlenbergbau; ISBN: 978-3-941277-04-5
- Band 72 Molina Vicuña, C. (2010).
Contributions to the analysis of vibrations and acoustic emissions for the condition monitoring of epicyclic gearboxes; ISBN: 978-3-941277-06-9
- Band 73 Nienhaus, K.; Burgwinkel, P. (2010).
AKIDA – 8. Aachener Kolloquium für Instandhaltung, Diagnose und Anlagenüberwachung – Tagungsband des Kolloquiums vom 17. – 18. November 2010; ISBN: 978-3-941277-08-3
- Band 74 Neye, E. (2010).
Integration von Informationstechnologie und Grubengebäude bei der Betriebsmittelplanung von Steinkohlebergwerken; ISBN: 978-3-941277-09-0
- Band 75 Vreydal, D. (2011).
Entwicklung und Einsatz numerischer Simulationsmodelle zur Restlebensdauerabschätzung bei Antriebssträngen von Hubwindensystemen unter Nutzung eines zweiparametrischen Kollektivverfahrens; ISBN: 978-3-941277-10-6
- Band 76 Mavroudis, F. (2011).
Infrarotsensorik zur Grenzschichterkennung – Entwicklung und Einsatz eines bildgebenden Infrarotsystems bei der Automatisierung von Walzenladern im Untertagebergbau; ISBN: 978-3-941277-12-0
- Band 77 Becker, S. (2011).
Weiterentwicklung und Erprobung eines Kollisionsschutzsystems für Personen und Fahrzeuge im Untertagebergbau; ISBN: 978-3-941277-13-7
- Band 78 Gaastra, M. (2012).
Online-Elementanalyse in der Rohstoffgewinnung – Entwicklung und Konzeptionierung von Anwendungen der laserinduzierten Plasmaspektroskopie zur Echtzeitbestimmung mineralischer Rohstoffe am Beispiel unter- und übertägiger Gewinnungsgeräte; ISBN: 978-3-941277-14-4
- Band 79 Vintila, C. R. (2012).
Entwicklung und Erprobung eines internetfähigen komponentenbasierten Informationssystems zur Echtzeitüberwachung von Schienenfahrzeugen; ISBN: 978-3-941277-15-1
- Band 80 Vijayakumar, N. (2012).
Computer based Prototype of Heavy Duty Drive Systems by Electromechanical Co-simulation; ISBN: 978-3-941277-16-8
- Band 81 Nienhaus, K.; Burgwinkel, P. (2012).
AKIDA – 9. Aachener Kolloquium für Instandhaltung, Diagnose und Anlagenüberwachung – Tagungsband des Kolloquiums vom 14. – 15. November 2012; ISBN: 978-3-941277-17-5
- Band 82 Baltes, R. (2013).
Entwicklung und Erprobung eines dieselektrischen Hybridantriebes; ISBN: 978-3-941277-18-2

- Band 83 Hahn, M. H. (2013).
Abbildendes Radarsystem für die Rohstoffindustrie; ISBN: 978-3-941277-19-9
- Band 84 Nienhaus, K.; Burgwinkel, P. (2014).
AKIDA – 10. Aachener Kolloquium für Instandhaltung, Diagnose und Anlagenüberwachung – Tagungsband des Kolloquiums vom 19. – 20. November 2014;
ISBN: 978-3-941277-21-2
- Band 85 Zingsheim, J. M. (2015).
Entwicklung und Konzeptionierung eines Positions- und Lagebestimmungssystems zur weiterführenden Automatisierung von Betriebsmitteln in der untertägigen Rohstoffgewinnung; ISBN: 978-3-941277-23-6
- Band 86 Bitzen, S. (2015).
Konzeption und Entwicklung eines 3D-Modell-basierten Prozessüberwachungssystems für die Rohstoffgewinnung; ISBN: 978-3-941277-24-3
- Band 87 Boos, F. D. (2015).
Acoustic Emission bei der Maschinen- und Prozessüberwachung - Neue Analysemethoden und Anwendungsgebiete; ISBN: 978-3-941277-25-0
- Band 88 Gárate Peñaranda, K. A. (2016).
Pattern Recognition, Classification and Diagnosis of Acoustic Emission Signals in Applications for Mining; ISBN: 978-3-941277-26-7
- Band 89 Schütz, M. (2016).
Konzeptentwurf und Erprobung eines Messsystems zur verbesserten Bestimmung der Ablegereife von Rundstahlgliederketten; ISBN: 978-3-941277-28-1
- Band 90 Berg, J. (2017).
Entwicklung und prototypischer Einsatz eines Infrarotkamarasystems für Automatisierungslösungen im Rohstoffsektor; ISBN: 978-3-941277-29-8