

FORSCHUNGSBERICHT

W. A. Günthner · J. Lechner

RFID-MobiVis – Mobile Lesefeld-
erfassung und -visualisierung von
UHF-RFID-Installationen

Forschungsbericht

zu dem IGF-Vorhaben

***RFID-MobiVis - Mobile Lesefelderfassung und -visualisierung von
UHF-RFID-Installationen***

der Forschungsstelle

Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München

Das IGF-Vorhaben 17390 N/1 der Forschungsvereinigung Bundesvereinigung
Logistik e.V. - BVL wurde über die



im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Herausgegeben von:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Willibald A. Günthner

fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Technische Universität München

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © **fml** – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Printed in Germany 2015

ISBN: 978-3-941702-54-7

fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Technische Universität München

Boltzmannstr. 15

85748 Garching

Telefon: + 49.89.289.15955

Telefax: + 49.89.289.15922

www.fml.mw.tum.de

Zusammenfassung

Aufgrund der vielen Vorteile der automatischen Identifikation durch UHF-RFID in logistischen Prozessen schreitet der Einsatz dieser Technologie immer weiter voran. Die hierfür aufgebauten UHF-RFID-Installationen müssen eine zuverlässige Erfassung der Transponder gewährleisten. Dies gilt es beim Aufbau oder Umbau derartiger Installationen nachzuweisen. Aktuelle Verfahren, die dazu eingesetzt werden, sind mit hohem Aufwand verbunden. Für eine schnelle und aufwandsarme Beurteilung der zuverlässigen Erfassung von Transpondern durch einen RFID-Aufbau wäre ein Abbild zur Verteilung der Feldstärke im elektromagnetischen Lesefeld von großem Nutzen. Daher ist das Ziel des Forschungsvorhabens eine Methode zur einfachen, mobilen und aufwandsarmen Erfassung und Visualisierung von UHF-RFID-Lesefeldern zu entwickeln.

Die Methode basiert auf dem Lösungsansatz, schnell an vielen Punkten im Raum die Feldstärke zu messen. Ermittelte Messdaten werden anschließend zur Lesefeldanalyse für den Anwender dreidimensional visualisiert. Dazu wird ein Softwarekonzept mit grafischer Bedienoberfläche für eine einfache Steuerung entwickelt. Die schnelle Erfassung vieler Feldstärkewerte an verschiedenen Punkten im Raum wird durch die Kombination eines Trackingsystems mit geeigneter Hochfrequenzmesstechnik ermöglicht. Das Trackingsystem erfasst dazu parallel zur Messung der Feldstärke die Position der Messsensorik. Diese Systeme werden in zwei Varianten konzipiert, eine State-of-the-Art-Variante aus hochwertigen Komponenten aus dem Stand der Technik und eine Low-Cost-Variante aus kostengünstigen Bestandteilen.

Durch die Evaluation der Konzepte, welche demonstratorisch umgesetzt werden, findet ein Vergleich der beiden Varianten statt. Dabei stellt sich heraus, dass selbst mit kostengünstiger Messtechnik ein System erzeugt werden kann, das eine schnelle Messung und Visualisierung von UHF-RFID-Lesefeldern ermöglicht. Die dazu erzeugte Visualisierung der Messergebnisse lässt eine schnelle Bewertung des Lesefeldes einer UHF-RFID-Installation zu.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Wissenschaftlich-technische Problemstellung	1
1.2	Forschungsziel	4
1.2.1	Angestrebte Forschungsergebnisse	5
1.2.2	Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse	5
1.2.3	Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels	6
2	Stand der Technik und der Wissenschaft	9
2.1	Methoden aus Normen und Standards zur Messung an RFID-Systemen	10
2.1.1	ISO/IEC-Normen ISO-18046, ISO-18046-3 und ISO-18047-6	10
2.1.2	EPCglobal Testvorschrift für RFID-Gates und RFID-Portale an Stetigförderanlagen [EPC-06a, EPC-06b]	11
2.1.3	EPCglobal Messvorschrift für RFID-Gates und RFID-Portale an Stetigförderanlagen [EPC-09a, EPC-09b]	12
2.1.4	VDI/AIM 4472-10: Testverfahren zur Überprüfung der Leistungsfähigkeit von Transpondersystemen (RFID) [VDI 4472-10]	13
2.1.5	Bewertung der Messmethoden und Testverfahren aus dem Stand der Technik	14
2.2	Verfahren und Systeme zur Ermittlung der Feldverteilung	17
2.2.1	Bestimmung der Feldausbreitung durch Simulation	17
2.2.2	Methoden und Technik zur Messung der Feldstärke	19
2.3	Trackingsysteme zur Positionsbestimmung	21
2.3.1	Elektromagnetisches Tracking	21
2.3.2	Tracking mittels Inertialsensorik	22
2.3.3	Mechanisches Tracking	22
2.3.4	Akustisches Tracking	23
2.3.5	Optisches Tracking	23
2.3.6	Hybrides Tracking	27
3	Analyse und Spezifikation von Anforderungen an ein System zur Lesefeldvermessung und -visualisierung	29
3.1	Grundlegende Anforderungen an ein System zur Analyse von Lesefeldern an UHF-RFID-Installationen	29

3.2	Konkretisierung und Spezifizierung der Anforderungen	31
3.2.1	Nutzen und Nutzer des Systems	32
3.2.2	Anforderungen zur Nutzung und Messung	32
3.2.3	Anforderung an das Softwaresystem	33
3.2.4	Anforderungen aus den favorisierten Einsatzszenarios	34
3.2.5	Anforderungen an den hardwaretechnischen Aufbau des Systems	34
3.2.6	Überblick zu den konkretisierten Anforderungen	35
4	Entwicklung eines Lesefeldmesssystems	37
4.1	Entwicklung eines Referenzlesefeldmesssystems	38
4.1.1	Bewertung und Auswahl des Referenztrackingsystems	38
4.1.2	Bewertung und Auswahl eines Referenzfeldmesssystems	44
4.1.3	Aufbau und Test des Referenzlesefeldmesssystems	49
4.2	Methode zur Optimierung von UHF-RFID-Installationen durch Erfassung und Visualisierung von Lesefeldern	58
4.3	Entwicklung eines Low-Cost-Messkonzepts	61
4.3.1	Entwicklung eines Low-Cost-Tracking-Konzepts	61
4.3.2	Entwicklung des Hochfrequenz Messkonzepts	69
5	Entwicklung von Softwarekonzepten zur Messdatenerfassung, -aufbereitung und -visualisierung	79
5.1	Softwarearchitektur zum System MobiVis	79
5.1.1	Datenhaltung im System MobiVis	81
5.1.2	Logikschicht im System MobiVis	82
5.1.3	Präsentationsschicht im System MobiVis	84
5.2	Implementierung der Software	86
5.3	Visualisierungskonzepte und Datenaufbereitung	86
5.3.1	Echtzeitvisualisierung zur Messung	87
5.3.2	Visualisierungsmethoden zur Lesefeldanalyse	91
6	Evaluation und Validierung der Messkonzepte	97
6.1	Evaluation der Systemvarianten	97
6.1.1	Evaluation der HF-Komponenten	97
6.1.2	Evaluation der Trackingsysteme	99
6.2	Validierung der Systemvarianten und des Gesamtsystems	104
6.2.1	Hardwaretechnischer Aufbau des Systems	104

6.2.2 Nutzung des Systems zur Messung	104
6.2.3 SW-Konzept zur Lesefeldanalyse	105
6.3 Möglichkeiten zur Erweiterung von EPCglobal Portal Field Strength Measurement Test Method	106
7 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und Ausblick	107
7.1 Zusammenfassung	107
7.2 Nutzen und industrielle Anwendungsmöglichkeiten	108
7.3 Ausblick	109
Literaturverzeichnis	111
Abbildungsverzeichnis	121
Tabellenverzeichnis	125

1 Einleitung

Heutzutage wird die RFID-Technologie in vielen Bereichen, unter anderem der Intra-logistik, eingesetzt. In Zukunft wird RFID laut den Führungskräften der Intra-logistik ein bedeutsamer Bestandteil in der Logistik sein [o.V-2014]. Dies stimmt mit den Ergebnissen einer Studie des RFID-Anwenderzentrums München (RFID-AZM) überein, die am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) der Technischen Universität München durchgeführt wurde [Gün-2010]. Aus der Studie geht hervor, dass 65% der befragten Unternehmen, die bisher noch keine RFID-Technik im Einsatz haben, dies in der Zukunft anstreben. Bei den Unternehmen mit bereits umgesetzten RFID-Anwendungen liegt die Quote weiterer Umsetzungen bei 96%. Diese Entwicklungen lassen sich aufgrund der vielen Vorteile der Identifizierung auf Basis elektromagnetischer Wellen gegenüber anderen Identifikationstechniken, wie z. B. dem Barcode, erklären.

1.1 Wissenschaftlich-technische Problemstellung

Laut *Dräger* wird zur Einführung von RFID immer noch häufig auf Pilotprojekte zurückgegriffen. Dabei stellt sich die Frage nach der Redundanz solcher Erprobungsprojekte aufgrund der umfangreichen Anwendung der Technologie in ähnlichen Szenarien. Es stellt sich aber heraus, dass Pilotprojekte immer noch ein adäquates Mittel zur Einführung von RFID-Systemen darstellen. Der Fokus rückt dabei vom reinen Aufzeigen der technischen Möglichkeiten von RFID-Technologie hin zur Frage nach der Funktionsweise dieser Technik unter den in der Anwendung vorherrschend Bedingungen sowie der Eingliederung in die angedachten Prozesse. [Drä-2014]

Der hohe Aufwand zur Einführung von RFID zeigt, dass es sich hier nicht um eine aufwandsarme Anwendung der Technik im Sinne von Plug-and-play handelt. Es empfiehlt sich daher auf technische Machbarkeitsuntersuchungen zurückzugreifen, die dabei helfen technische Hürden frühzeitig zu erkennen und diese bei der Projektgestaltung zu berücksichtigen [Sch-2007a, o.V-2008]. Für die Quantifizierung der Leistungsfähigkeit von RFID-Installationen können bereits existierende Testverfahren und Normen verwendet werden. Beispiele hierfür sind die Normen, in denen Testverfahren für die Systemleistung von RFID-Einrichtungen [ISO 18046-1], RFID-Abfragegeräten [ISO 18046-2] und RFID-Transpondern [ISO 18046-3] behandelt werden. Weiter werden in der VDI-Richtlinie 4472 Blatt 10 standardisierte Bedingungen für das allgemeine Testen von RFID-Systemkomponenten definiert [VDI 4472-

10]. Darin beschriebene Testverfahren konzentrieren sich überwiegend auf die Bewertung der eingesetzten Technik. Jedoch ist auch die Betrachtung der Wechselwirkung einer UHF-RFID-Installation mit der Umgebung zur erfolgreichen Konzeption wichtig. Gerade bei komplexeren RFID-Installationen (z. B. Pulkerfassung im Gate oder die Identifikation am Flurförderzeug) ist die Sensibilität der UHF-RFID-Technologie auf die physischen Umgebungsbedingungen zu betrachten und gestaltet die erfolgreiche Umsetzung als schwierig. Erfahrungsgemäß sollte daher ein ausreichender Zeitbedarf bei der Untersuchung der eingesetzten Technik und IT an realitätsnahen Bedingungen eingeplant werden [Kau-2006]. Dies stellt einen Kostenfaktor dar, der vor allem für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) auf Seiten der Systemintegratoren sowie auf Seiten der Anwender ein hohes Risiko darstellt.

Der Zeitaufwand für Untersuchungen und Optimierungen der technischen Umsetzung bei der Inbetriebnahme von RFID-Installationen stellt trotz der erwähnten Testverfahren und Normen eine Hemmschwelle beim Einstieg in die RFID-Technologie dar. Die Gründe für den hohen Aufwand bei der Inbetriebnahme lassen sich oftmals auf die komplexe Form der Ausbreitung des elektromagnetischen Lesefeldes zurückführen. Diese Komplexität basiert auf den starken Wechselwirkungen des elektromagnetischen Feldes mit der physischen Umwelt. Durch Abschirmungen und Interferenzerscheinungen aufgrund von Reflexion oder Absorption entstehen im Lesefeld vereinzelt Stellen unerwartet niedriger sowie auch hoher Feldstärkewerte. Für die in der Logistik verwendeten passiven UHF-RFID-Systeme hat dies aufgrund der Energieversorgung der Transponder über das Lesefeld unerwünschte Folgen. Innerhalb des gewünschten Erfassungsraumes können Schwachstellen für die Identifizierung vorhanden sein. Außerhalb des erwünschten Lesebereichs können aufgrund der erhöhten Feldstärkebereiche durch konstruktive Interferenz Fehllösungen erfolgen. Zur Verdeutlichung dieses Sachverhalts ist in Abbildung 1-1 die ideale Feldausbreitung (links) einer einzelnen UHF-Antenne der realen Ausprägung eines Antennenfeldes (rechts) gegenübergestellt. Im realen Feld sind die beschriebenen Stellen mit höherer Intensität in größerer Entfernung von der Antenne als auch die entstehenden Schwachstellen innerhalb des gewünschten Lesebereichs schematisch dargestellt.

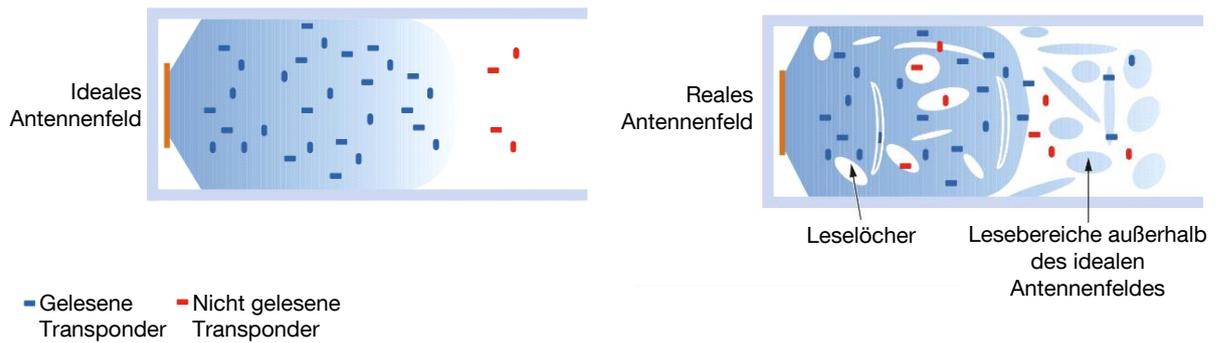


Abbildung 1-1: Ideales Antennenfeld einer UHF-Antenne (links) gegenüber einem realen Antennenfeld (rechts)

Ein derartiges Abbild zur Feldstärkeverteilung als Hilfsmittel zur Bewertung des Lesefeldes an der RFID-Installation steht dem Systemintegrator nicht zur Verfügung. Zudem erschwert eine wesentlich komplexere Verformung des Lesefeldes, was auf die Anwesenheit mehrerer Antennen und mehrerer feldverformender Objekte zurückzuführen ist, die Beurteilung des Lesefeldes im realen Einsatz. Umso mehr ist die Kenntnis zur Ausbreitung des Lesefeldes an der Installation die beste Grundlage zur Beurteilung des Lesebereichs.

Aktuell gestaltet sich der Aufwand zur Feststellung der Feldverteilung sehr hoch. Eine Messantenne muss platziert, anschließend jeweils eine Messung durchgeführt sowie die Position der Messantenne bestimmt werden. Die Aufzeichnung der Werte geschieht meist manuell in Form durch Eintragung in einer Tabelle. Dieser Ablauf muss für alle definierten Messpunkte wiederholt werden. In den meisten Fällen stellt dies einen unverhältnismäßigen Aufwand dar und führt zum Verzicht auf derartige Messungen. In diesen Fällen wird versucht, die Validierung der Installation direkt über Praxistests durchzuführen. Unter Praxistests sind Versuche zu verstehen, bei denen exemplarische Konstellationen von Objekten mit angebrachten Transpondern direkt durch den Erfassungsaufbau bewegt werden. Dabei werden die Leseerfolge zu den einzelnen Transpondern erfasst, um die Funktionsfähigkeit der Konfiguration an der Installation zu ermitteln.

Der Nachweis einer hohen Lesequote der aufgebauten RFID-Installation ist für den erfolgreichen Einsatz der RFID-Identifikationstechnik unabdingbar. Dieser ist jedoch nur durch Nutzung der aufwendigen oben beschriebenen Verfahren möglich und nur für die Situation bzw. Konfiguration zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme gültig. Ändern sich zu einem späteren Zeitpunkt die Umgebungsbedingungen durch ggf. nötige Umbaumaßnahmen, so verändert dies wiederum die Feldstärkeverteilung. Dies bewirkt eine Veränderung in der räumlichen Ausprägung des Lesefeldes und kann zu einer extrem verschlechterten Lesequote führen. Somit müsste nach einer Änderung des Aufbaus oder des Umfeldes der Installation ein erneuter Nachweis der Le-

sequote erfolgen. Aufgrund des hohen Aufwands wird dies in vielen Fällen unterlassen.

In den wenigen Fällen, in denen Feldstärkemessungen durchgeführt werden, erfolgt die Definition weniger Referenzpunkte über die Nutzung mechanischer Positionier-
vorrichtungen. Dieses Vorgehen stößt jedoch gerade bei mobilen Anwendungen von RFID wie z. B. am Flurförderzeug an seine Grenzen.

Es zeigt sich also der Bedarf für eine durchgängige und aufwandsarme Möglichkeit zur Messung der Feldstärkeverteilung an RFID-Installationen als Grundlage für die Beurteilung des Lesefeldes. Zudem wird eine Darstellung der Messergebnisse benötigt, die Rückschlüsse auf eine Optimierung der RFID-Installation hinsichtlich der Lesequote erlaubt.

1.2 Forschungsziel

Entsprechend der Problemstellung wird im Forschungsvorhaben eine neuartige Möglichkeit zur Erfassung der Feldstärkeverteilung entwickelt. Der dabei verwendete Ansatz ist die Kombination eines Systems zur Feldstärkemessung mit einem Positionserfassungs- bzw. einem Trackingsystem. Die parallele Erfassung von Feldstärke und den zugehörigen Werten zur Position und Orientierung (Pose) der Messantenne, während diese manuell durch den Raum der RFID-Installation geführt wird, ermöglicht es schnell und flexibel eine große Anzahl an Messpunkten zu erfassen. Mit den erhobenen Messdaten lassen sich Methoden anwenden, welche eine Abbildung des gemessenen Lesefeldes in Form einer dreidimensionalen Abbildung erlauben. Die gewonnenen Darstellungen zum Lesefeld schaffen eine Bewertungsgrundlage für das elektromagnetische Lesefeld an einer UHF-RFID-Installation. Diese schnelle Möglichkeit zur Bewertung der Feldverteilung zielt auf einen verringerten Aufwand bei der Optimierung eines RFID-Aufbaus hinsichtlich der geforderten Lesequote ab.

Zusammenfassend ist das Ziel dieses Forschungsvorhabens, eine Methode mit zugehörigem Hard- und Softwarekonzept zur UHF-RFID-Lesefeldvermessung zu entwickeln. Dadurch soll eine Möglichkeit zur Analyse eines Lesefeldes entstehen und der Aufwand bei der Optimierung von UHF-RFID-Installationen verringert werden.

1.2.1 Angestrebte Forschungsergebnisse

Im Rahmen des Forschungsvorhabens sollen zwei Varianten eines neuartigen Messsystems konzipiert und demonstratorisch umgesetzt werden. Auf Basis ermittelter Anforderungen werden zunächst Komponenten aus dem Stand der Technik (State-of-the-Art) der Bereiche Positionserfassung sowie Hochfrequenzmesstechnik (HF-Messtechnik) zum Aufbau eines ersten Lesefeldmesssystems verwendet. Die mit dem System erfassbaren Messwerte besitzen eine hohe Güte und dienen der Evaluierung eines im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens aufgebauten Systems zur Messung positionsbezogener Feldstärkemesswerte, welches sich aus günstigen (Low-Cost) Komponenten zusammensetzt.

Zur Verknüpfung der vom Trackingsystem erfassten Werte und der HF-Messtechnik wird eine geeignete Methode erarbeitet. Fehlerbehaftete Werte müssen dabei bestimmt und berücksichtigt werden. Um aus den verknüpften Daten Darstellungen zur Analyse des Lesefeldes an der UHF-RFID-Installation zu erzeugen, werden zuvor geeignete Visualisierungsmethoden entwickelt.

Nach dem Aufbau der verschiedenen Systemausprägungen findet eine Systemevaluation durch den Vergleich der gemessenen Werte statt. Am Ende des Projekts wird mit den gewonnen Erkenntnissen ein Vorschlag zur Erweiterung eines EPCglobal-Standards zur Vermessung von RFID-Installationen mit der entwickelten Messmethodik gemacht.

1.2.2 Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse

Der innovative Beitrag des Forschungsprojekts ist die Entwicklung eines Konzepts zur flexiblen, mobilen und kostengünstigen Messung der Feldstärke eines RFID-Systems an vielen Punkten im Raum. Dies steht den Messmethoden bisheriger Normen ([EPC-06a, EPC-06b, DIN EN 61000-4-3]), bei denen wenige Messpunkte mit vergleichsweise hohem Aufwand erzeugt werden, gegenüber. Die Möglichkeit zur genaueren und schnelleren Messung eines RFID-Aufbaus können Systemintegratoren und Anwender zur effizienten Fehleranalyse nutzen. Bisherige RFID-Feldmessungen von [MIT-2008], [Mue-2009] und [Hoe-2011] zeigen den Bedarf einer Visualisierung der Feldstärken. Derartige grafische Darstellungen werden bisher aber stets nur 2-dimensional oder in Kombination mit aufwendigen Verfahrenssystemen in 3D umgesetzt. Die Innovation im Forschungsvorhaben liegt in der sinnvollen Kombination von Techniken zur Positionserfassung und HF-Messung, konkret in der Ermittlung der Lesefeldausprägung an einer UHF-RFID-Installation durch Feldstärkemessung mit einer getrackten Feldstärkesonde. Für Systemintegratoren und Anwender nutzbar wird das Verfahren jedoch erst durch den zusätzlichen innovativen

Schritt der Datenauswertung und -visualisierung. Die Rohdaten müssen nachbearbeitet und anwendergerecht dargestellt sowie bewertet werden. Damit geht das Forschungsvorhaben weit über die bisherigen Anstrengungen zur praxisnahen Untersuchung eines RFID-Systems hinaus und bietet Möglichkeiten einer neuen Form der Optimierung von RFID-Aufbauten, indem reale Lesefeldausprägungen „sichtbar“ gemacht werden.

1.2.3 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels

Das Vorgehen zur Konzeption und dem Aufbau der für ein mobiles Lesefeldfassungssystem benötigten Teilkomponenten gliedert sich in mehrere, aufeinander aufbauende Arbeitspakete (siehe Abbildung 1-2). Zu Beginn wird eine Anforderungsanalyse durchgeführt und Einsatzszenarien werden festgelegt. Danach wird jeweils ein Lesefeldmesssystem bestehend aus einem Trackingsystem und einem Feldmesssystem in einer Low-Cost-Variante sowie einer State-of-the-Art-Version entworfen und aufgebaut. Die unterschiedlichen Versionen sollen im Vergleich Aufschluss darüber geben, ob mit kostengünstigen Komponenten ebenso nutzbare Erkenntnisse aus einer Messung gewonnen werden können. Die darauffolgenden zwei Arbeitspakete befassen sich mit der Verwertung der erfassten Daten und deren Visualisierung. Zudem wird eine Interaktionsmöglichkeit für den Benutzer mit dem System erarbeitet. Abschließend finden eine Evaluierung der Lösungsalternativen sowie die Dokumentation des Projektes statt.

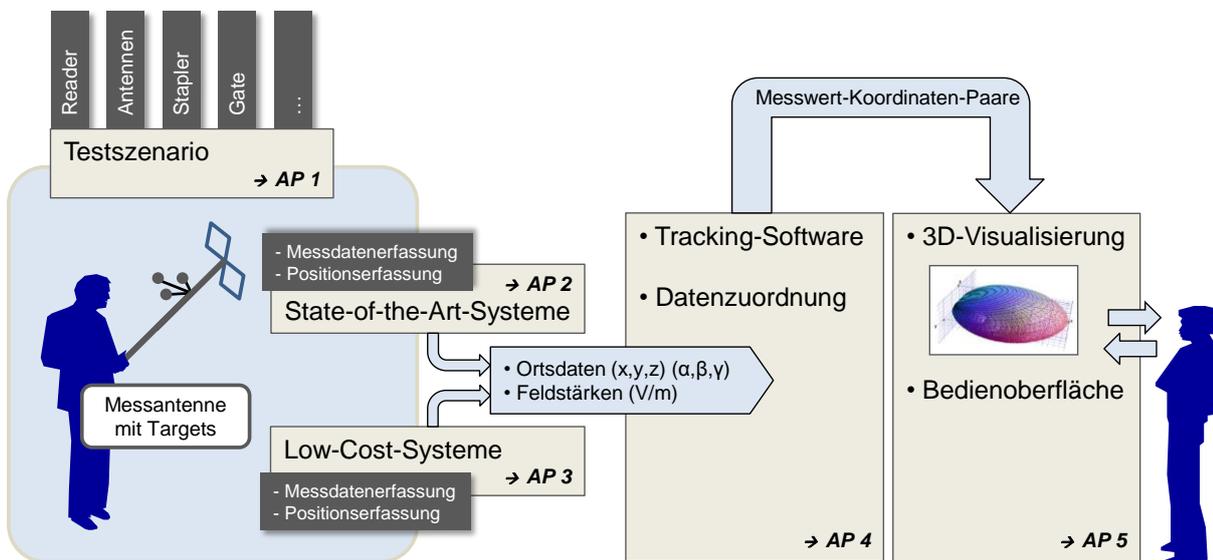


Abbildung 1-2: Arbeitspakete des Forschungsprojekts im Zusammenhang mit einem Konzept für ein System zur mobilen RFID-Lesefeldfassung

AP 1: Anforderungsermittlung für das Erfassungssystem und Szenariendefinition für Lesefelduntersuchungen

Im AP 1 werden die Anforderungen an ein mobiles System zur Erfassung von Feldstärken in einem UHF-RFID-Lesefeld aufgenommen und festgelegt (siehe Abschnitt 3). Dies geschieht in Zusammenarbeit mit den Industriepartnern im Rahmen des ersten Projekttreffens. Dabei werden die Eigenschaften des Systems hinsichtlich der Messung, seines Aufbaus und dessen Verwendung spezifiziert. Zudem werden die Randbedingungen des Einsatzes und die Hauptanwendungsszenarien erarbeitet.

AP 2: Konzeption, Aufbau und Test eines Referenzmesssystems zur parallelen Erfassung der Feldstärke mit der zugehörigen Pose der Messsensorik

Auf Basis der zuvor in AP 1 ermittelten Anforderungen wird in diesem Arbeitspaket eine Marktrecherche zu geeigneten State-of-the-Art-Systemkomponenten durchgeführt. In einer ersten Testsoftware werden dann die Komponenten über Schnittstellen angebunden und Erfahrungen in der Benutzung des Systems gesammelt, um diese in die Konzeption des Low-Cost-Messsystems mit einfließen zu lassen (siehe Abschnitt 4.1).

AP 3: Konzeption und Aufbau des Messsystems aus Low-Cost-Komponenten

In diesem AP wird, unter Berücksichtigung der spezifizierten Anforderungen und unter Einbeziehung der mit dem State-of-the-Art-System gemachten Erfahrungen, ein Konzept zur Realisierung eines kostengünstigen Lesefeldmesssystems entwickelt (siehe Abschnitt 4.3).

AP 4: Entwicklung von Methoden zur Datenzuordnung und -auswertung mit Implementierung der Methoden zur Ortung

Für die Verwendung der Rohdaten zur Visualisierung werden Methoden ausgearbeitet, die die Verknüpfung der erfassten Daten ermöglichen (siehe Abschnitt 5). Um einen Bezug zwischen den gelieferten Messdaten und dem untersuchten RFID-Aufbau zu erzeugen wird zudem eine Methode zur Festlegung eines Bezugskoordinatensystems realisiert (siehe Abschnitt 4.3.1).

AP 5: Entwicklung von 3D-Visualisierungsmethoden und einer grafischen Benutzeroberfläche (GUI)

In AP 5 werden die zur Analyse eines Lesefeldes benötigten Darstellungsmöglichkeiten der Messergebnisse hinsichtlich der in AP 1 festgelegten Ziele bei der Vermessung von UHF-RFID-Installationen entwickelt und realisiert. Für eine einfache und intuitive Bedienung des Systems wird eine passende Benutzeroberfläche für die Software umgesetzt (siehe Abschnitt 5.1.3). Die 3D-Visualisierungssoftware-

komponente wird ebenso in diesem Arbeitspaket entwickelt und in das Gesamtsoftwaresystem integriert (siehe Abschnitt 5.3).

AP 6: Evaluation des Gesamtsystems und Vergleich der Low-Cost- und State-of-the-Art-Lösung

Zur Feststellung der Eignung der entwickelten Konzepte gegenüber den spezifizierten Anforderungen wird der erzeugte Funktionsdemonstrator anhand eines realitätsgetreuen Aufbaus eines RFID-Identifikationspunktes evaluiert (siehe Kapitel 6). Darüber hinaus werden die von den kostengünstigen Komponenten gelieferten Ergebnisse mit den Resultaten, die mit den Komponenten aus dem Stand der Technik erzeugt werden, verglichen.

AP 7: Dokumentation der Projektergebnisse und Vorschlag zur Erweiterung von EPCglobal-Richtlinien

Es findet eine detaillierte Dokumentation der Erkenntnisse und Erzeugnisse (Hard- und Software) statt. Auf Grundlage der neuartigen Messmethode wird ein Vorschlag zur Erweiterung der Messstandards aus dem EPCglobal Netzwerk eingebracht.

2 Stand der Technik und der Wissenschaft

Hinter dem Begriff RFID (**R**adio **F**requency **I**dentification) verbirgt sich eine Vielzahl unterschiedlicher Systeme zur berührungslosen Identifikation ohne Sichtkontakt. Die Hauptunterscheidungsmerkmale für RFID-Systeme sind der genutzte Frequenzbereich und das damit verknüpfte Kopplungsverfahren sowie die dadurch erzielbare Reichweite [Fin-2012]. Der genutzte Frequenzbereich wirkt sich aber nicht nur auf die Reichweite aus. Auch der Einfluss von Wasser in der Umgebung bzw. in der Funkstrecke hat aufgrund der frequenzspezifischen Absorptionsrate stark unterschiedliche Auswirkungen auf die Funktion der Systeme [Fin-2012]. Die Logistik stellt verschiedenste Anforderungen an die Identifikation von Ladehilfsmitteln, Waren und sonstigen Geräten. Die mit sehr hohen Frequenzen arbeitende UHF-RFID ist für überdurchschnittlich viele Aufgaben der Intralogistik geeignet. Die Vorteile der UHF-RFID liegen vor allem in der Kombination aus relativ geringen Kosten durch die Nutzung passiver Transponder, der vergleichsweise hohen Reichweite sowie der ausgeprägten Fähigkeit zur Pulklesung. Daraus ergeben sich große Nutzenpotenziale für die Logistik [Gün-2008, Uys-2008, Fis-2008]. Aufgrund der starken Wechselwirkungen der UHF-RFID mit deren Umfeld gestaltet sich die Implementierung solcher Systeme im Vergleich schwieriger als bei HF-RFID oder LF-RFID, da hier die Beeinflussung der Lesfelder relativ gering ist [Gün-2011]. Der Bedarf für Untersuchungen zur Lesbarkeit der Transponder ist also im Bereich UHF-RFID am größten. Deshalb fokussieren sich die weiteren Ausführungen auf den UHF-Standard, wobei die entwickelten Konzepte auch auf RFID-Systeme mit anderen Frequenzbereichen übertragen werden können.

Im ersten Abschnitt dieses Kapitels wird zunächst auf genormte Methoden und Standards zur Messung an RFID-Systemen eingegangen. Der nächste Abschnitt beschäftigt sich mit Verfahren und Systemen, die es ermöglichen, die Verteilung elektromagnetischer Felder zu ermitteln. Entsprechend dem Ansatz, die Feldverteilung durch gleichzeitige Messung von Feldstärke mit Pose der Messsensorik zu erhalten, werden im letzten Abschnitt dieses Kapitels Trackingsysteme zur Erfassung der Pose betrachtet.

2.1 Methoden aus Normen und Standards zur Messung an RFID-Systemen

Es existieren zahlreiche Testverfahren und Normen, welche die Leistungsfähigkeit von RFID quantifizieren. Zu nennen ist hier beispielsweise die Norm ISO 18046-3, die in erster Linie Angaben zur wiederholbaren Messung von Transponder-Leistungsdaten macht. In der VDI-Richtlinie 4472 Blatt 10 werden zudem standardisierte Bedingungen für das allgemeine Testen von RFID-Systemkomponenten geschaffen. Die dort aufgeführten Testverfahren beziehen sich jedoch auf die Bewertung der Technik durch Labortests mit Messtechnik ([ISO 18047-6, ISO 18046, ISO 18046-3]) oder Praxistests durch mehrfache Wiederholung der Erfassung ([EPC-06a, EPC-06a, VDI 4472-10]). Im Folgenden erfolgt eine kurze Beschreibung der erwähnten Normen und Standards.

2.1.1 ISO/IEC-Normen ISO-18046, ISO-18046-3 und ISO-18047-6

Die aufgeführten ISO/IEC-Normen beschreiben Tests für RFID-Komponenten und Systeme auf einer sehr grundlegenden Ebene. So definiert die ISO/IEC 18046: 2006 "RFID Performance Test Methods" allgemeine Leistungsmessungen für RFID-Geräte [ISO 18046]. Es werden beispielhaft relevante Faktoren für die Vermessung von RFID-Geräten wie Frequenz, Leistung, Antennengewinn, Empfängerempfindlichkeit und Modulationscharakteristik für einen RFID-Reader aufgeführt. Eine derartige Aufzählung existiert ebenso für Transponder, Materialien und Applikationsumgebungen. Zudem wird die Reichweite über verschiedene Längenangaben bzw. Maße definiert, wie in Abbildung 2-2 gezeigt. Die Messungen sollen in einer für RFID günstigen und wiederholbaren Umgebung stattfinden. In der Norm wird hierfür eine Messkammer (Abbildung 2-1) oder eine Freigeländetestfläche (OATS – Open Area Test Site) genannt und mit genaueren Spezifikationen beschrieben. Als weitere Möglichkeit wird das Testen in einer TEM-Kammer behandelt, welche für elektromagnetische Prüfungen und Messungen eine definierte Umgebung bzw. Ausbreitungssituation schafft. Hierzu sind zwei geeignete Modelle aufgeführt.

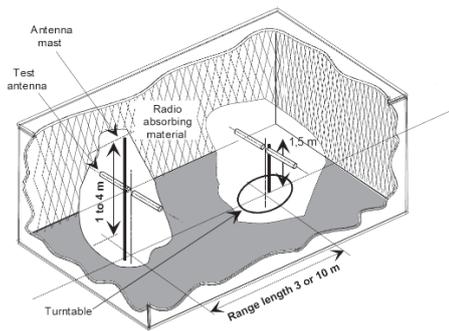


Abbildung 2-1: HF-Testkammer
[ISO 18047-6]

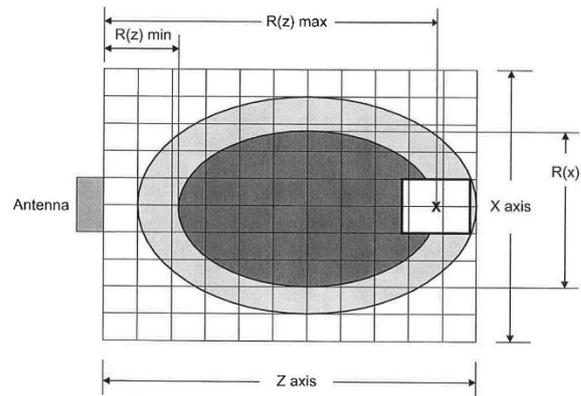


Abbildung 2-2: Beispiel für messbaren Erfassungsbereich bei Laborumgebung
[ISO 18047-6]

Die Norm ISO/IEC 18046-3 "Test Methods For Tag Performance" geht konkret auf das Testen der Leistungsfähigkeit von Transpondern ein [ISO-18046-3]. Es wird unterschieden, welcher Transponderstandard getestet werden soll. Im Folgenden werden die Testmethoden für Backscatter-UHF-Transponder nach ISO18000-6 betrachtet. Der Testaufbau ist derselbe synthetische Aufbau, der auch in der ISO/IEC 18046:2006 beschrieben wird (abgeschirmte Kammer oder eine Freiraumtestfläche). Folgende Parameter der Transponder werden getestet:

- minimale Lese- und Schreibfeldstärke mit Orientierungsabhängigkeit
- maximale Feldstärke für Lesen und Überleben
- Rückstreuquerschnittsänderung des Transponders
- Interferenzempfindlichkeit
- Identifizierungs- und Schreibfaderate (Einfluss schwankender Signalstärke)

Aus diesen Parametern lässt sich insbesondere die Messung der minimalen Feldstärken und der Orientierungsabhängigkeit für Leistungsaussagen in der Praxis ableiten.

2.1.2 EPCglobal Testvorschrift für RFID-Gates und RFID-Portale an Stetigförderanlagen [EPC-06a, EPC-06b]

EPCglobal wurde 2003 von GS1 und GS1 US (ehemals EAN International und Uniform Code Council, Inc.) gegründet und entwickelt Standards für die einheitliche Nutzung von RFID in der gesamten Versorgungskette. Unter anderem stammt von EPCglobal der Transponder-Reader-Luftschnittstellenstandard EPC Gen2 (übernommen in die ISO 18000-6C), der die weltweite Anwendung von RFID in der Supply Chain erheblich erleichtert.

Neben diesen Technikstandards hat EPCglobal auch Testverfahren zur Quantifizierung der Performance von RFID-Installationen erstellt. Die beiden Dokumente zu den Testvorschriften beschreiben den Test an RFID-Gates und an Rollenbahnen bzw. Gurtförderern. Die Testvorschriften zu den unterschiedlichen RFID-Installationen unterscheiden sich hier jeweils nur im Testaufbau.

Bei den Tests an Förderbändern und Rollenbahnen wird vorgeschrieben, dass die einzelnen Versuche jeweils mindestens zehnmal durchzuführen sind. Für den Portaltest werden keine Vorgaben zur Wiederholhäufigkeit gemacht. Die größere Ausdehnung des Lesebereichs lässt hier eine deutliche Zunahme der notwendigen Tests annehmen, damit eine zuverlässige Aussage über die Lesequalität getroffen werden kann. Dies bedeutet einen sehr hohen Aufwand.

Der Erfassungsraum, in dem Transponder gelesen werden können, soll unter Anwendung der im Folgenden dargestellten Feldstärkemessvorschriften ermittelt werden.

2.1.3 EPCglobal Messvorschrift für RFID-Gates und RFID-Portale an Stetigförderanlagen [EPC-09a, EPC-09b]

In diesen beiden Dokumenten wird das Vorgehen zu einer manuellen Messung der Feldstärke auf einer Förderstrecke und in einem Gate beschrieben. Dazu werden, wie in Abbildung 2-3 und Abbildung 2-4 gezeigt, Punkte definiert, an denen die Feldstärke mittels einer kalibrierten Dipolantenne und einem Spektrumanalysator gemessen wird. Das Feld wird hierbei von einem RFID-Reader erzeugt.

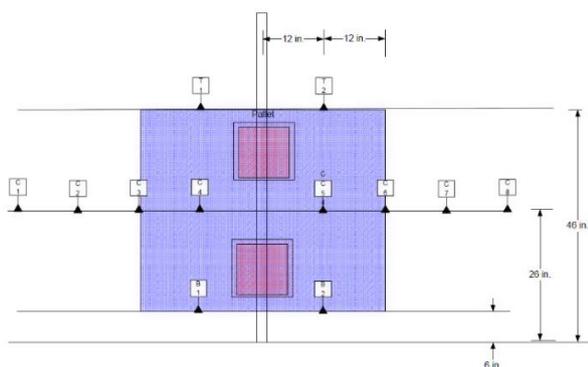


Abbildung 2-3: Messpunkte an einem Gate von oben [EPC-09b]

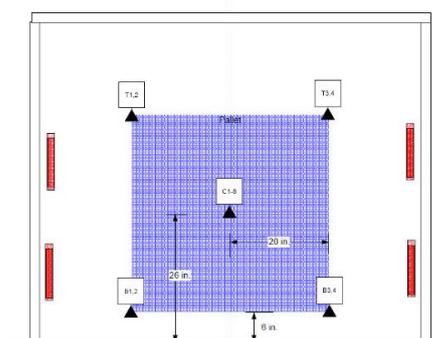


Abbildung 2-4: Messpunkte an einem Gate von links [EPC-09b]

Als Qualitätskriterium wird eine Empfangsleistung an einem kalibrierten Dipol von +1dBm als sehr gut, von -2dBm als gut und von -5dBm als ausreichend für eine RFID-Erfassung definiert.

2.1.4 VDI/AIM 4472-10: Testverfahren zur Überprüfung der Leistungsfähigkeit von Transpondersystemen (RFID) [VDI 4472-10]

Die Richtlinie VDI/AIM 4472 Blatt 10 bezieht sich zur Beschreibung von RFID-Testverfahren im Besonderen auf die ISO/IEC 18046 [VDI 4472-10]. Die Messung der Transponderqualität durch Entfernungsmessung, die Beschreibung der relevanten Testparameter und die statischen Messungen entsprechen daher weitgehend der internationalen ISO-Norm und sind daher von denselben Einschränkungen betroffen.

Neben der Definition von Praxistests mit Transponderpuls bei Erfassungsaufbauten mit Gates, die jeweils 100 Mal zu wiederholen sind, werden auch statische Tests definiert, die der Ermittlung des Erfassungsbereichs analog der Beschreibungen in [ISO 18046], dienen. Hierzu wird ein 3D-Raster aus Messpunkten (siehe Abbildung 2-5) innerhalb eines Gates definiert.

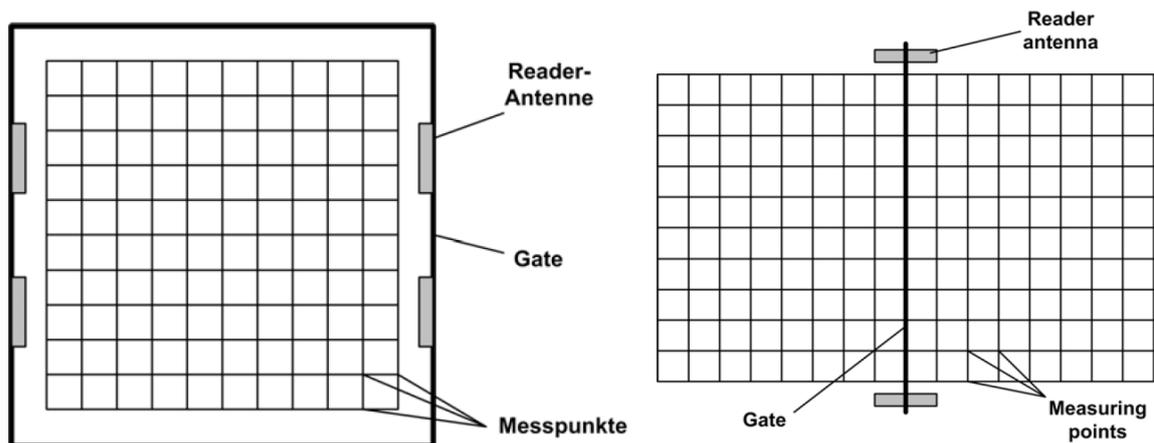


Abbildung 2-5: *Beispielhafte Messpunktdefinition für ein Gate nach [VDI 4472-10], links in der Frontalansicht, rechts in der Seitenansicht*

Zur Überprüfung bzw. zur Ermittlung des Erfassungsbereichs wird ein einzelner Transponder im Untersuchungsbereich mithilfe einer Messvorrichtung an den Messpunkten platziert. An jedem Messpunkt wird für zwei Sekunden versucht, mit dem Transponder zu kommunizieren. Als Ergebnis wird festgehalten, ob die Kommunikation mit dem Transponder erfolgreich durchgeführt werden konnte oder nicht. Es wird empfohlen, die Ergebnisse zu bestätigen bzw. deren Qualität zu erhöhen, indem fünf Transponder des gleichen Typs sequenziell untersucht werden.

2.1.5 Bewertung der Messmethoden und Testverfahren aus dem Stand der Technik

Die beschriebenen Testverfahren und Methoden weisen hinsichtlich der Beurteilung von UHF-RFID-Installationen einige Nachteile auf. Dies gilt vor allem für die Bewertung der Konfigurationen von Erfassungsaufbauten im realen Umfeld unter realen Bedingungen. Es zeigen sich aber auch Potenziale hinsichtlich der im Forschungsprojekt angestrebten Bewertung von Installationen auf Basis der gemessenen Feldstärke im Raum.

ISO 18046

Die Norm ISO 18046 fordert eine Messkammer oder eine Freigeländetestfläche als günstige Umgebung für die Leistungstests. Dies sorgt zwar für gut reproduzierbare Testumgebungen bzw. Testbedingungen, die Ergebnisse liefern jedoch nur Grundlagen für die Einschätzung der Leistung der Komponenten unter Praxisbedingungen. Hauptgrund hierfür sind die am realen Einsatzort herrschenden Einflüsse auf das elektromagnetische Feld. Beispielsweise können Störsignale sowie Reflexionerscheinungen die Leistung der Komponenten unter Realbedingungen stark beeinflussen. Diese werden beim Test unter den in der Norm geforderten Bedingungen nicht berücksichtigt.

ISO 18046-3

Die in der Norm ISO 18046-3 beschriebenen Testverfahren bedürfen den gleichen künstlichen Bedingungen wie sie in der Norm ISO 18046 gefordert sind. Die sich ergebenden Resultate zum minimalen Feldstärkebedarf für einen Transponder können als Grundlage für die Bewertung von Lesefeldern im Sinne des Forschungsziels genutzt werden. Wird die im Forschungsprojekt entwickelte Messung der Feldstärke im Raum auf die minimal benötigte Feldstärke eines Transponders bezogen, so kann auf Basis der gemessenen Feldstärkewerte ein Rückschluss auf die tatsächliche Ausprägung des Lesefeldes der Installation im Praxisumfeld gewonnen werden.

EPCglobal Mess- und Testvorschriften

In den EPCglobal Testvorschriften finden sich Vorgaben für Tests, die die Ausprägung des Gates bzw. des Portals betreffen. Beispielsweise soll der Boden der Installation mit einer 6 mm dicken Metallplatte ausgestattet werden und die Antennen sollen am Portal nur ohne Verkipfung angebracht werden. Die Portalabmessungen können prinzipiell beliebig gewählt werden, es werden jedoch auch dazu Empfehlungen gemacht. Außerdem wird die Verwendung von Absorbermaterial zur Vermeidung von unerwünschten Reflexionen an nahegelegenen Wänden vorgeschlagen. Hier werden allerdings nur grobe Hinweise zur Positionierung gegeben. Über die Visualisierung der Feldstärkeverteilung, wie sie im Forschungsprojekt entwickelt

wird, kann der Einfluss des Absorbermaterials an der jeweiligen Position schnell analysiert werden.

Die Messvorschrift für Erfassungen durch Gate-Aufbauten und Portalen an Stetigförderern beschreibt Messungen mit einem Dipol in nur einer Ausrichtung pro Messpunkt. Dadurch lassen die Messwerte jeweils nur Aussagen für Transponder zu, die in einer ähnlichen Ausrichtung die Installation passieren. Da für einen Messvorgang die Antenne immer manuell zu einem ausgemessenen Punkt gebracht werden muss, ist die Ermittlung der Feldstärke im Volumen des Gates nur punktuell möglich. Dass die Feldstärke innerhalb von Erfassungsaufbauten aber in Abständen von weniger als 50cm sehr stark schwanken kann, zeigt Abbildung 2-6. In Abbildung 2-7 ist bei Verwendung einer flächigen Antenne und einer stark reflektierenden Umgebung eine noch stärkere Beeinflussung der Feldstärke über die Position im Raum erkennbar.

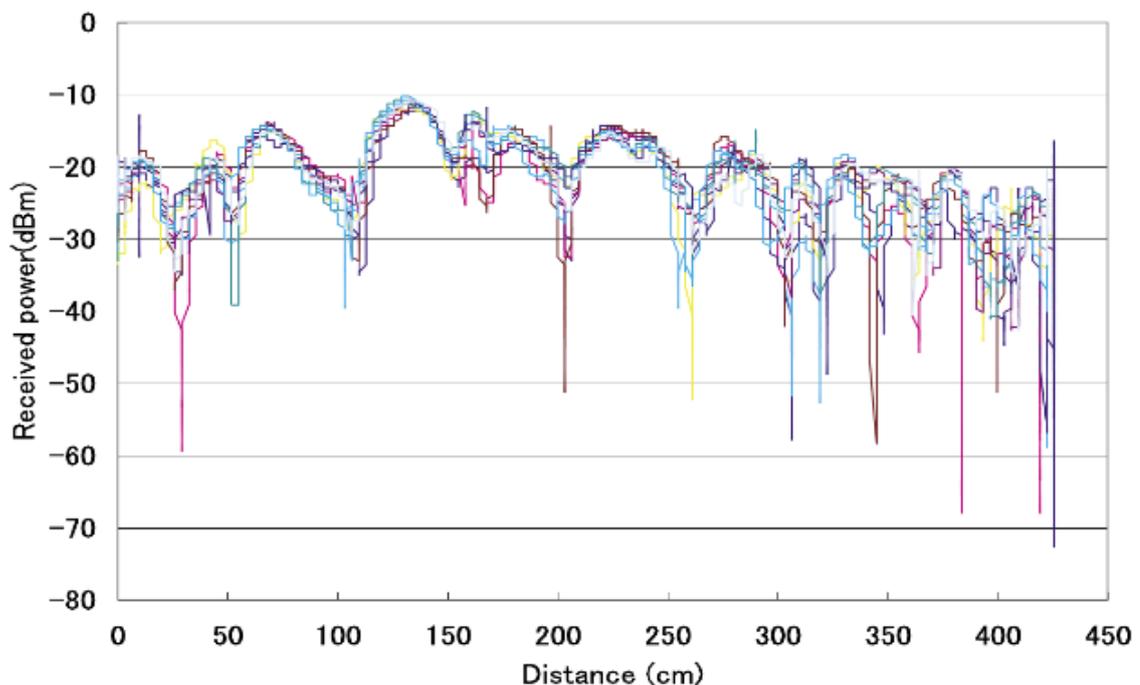


Abbildung 2-6: Schwankungen der Feldstärke in einem Gate [MIT-2005]

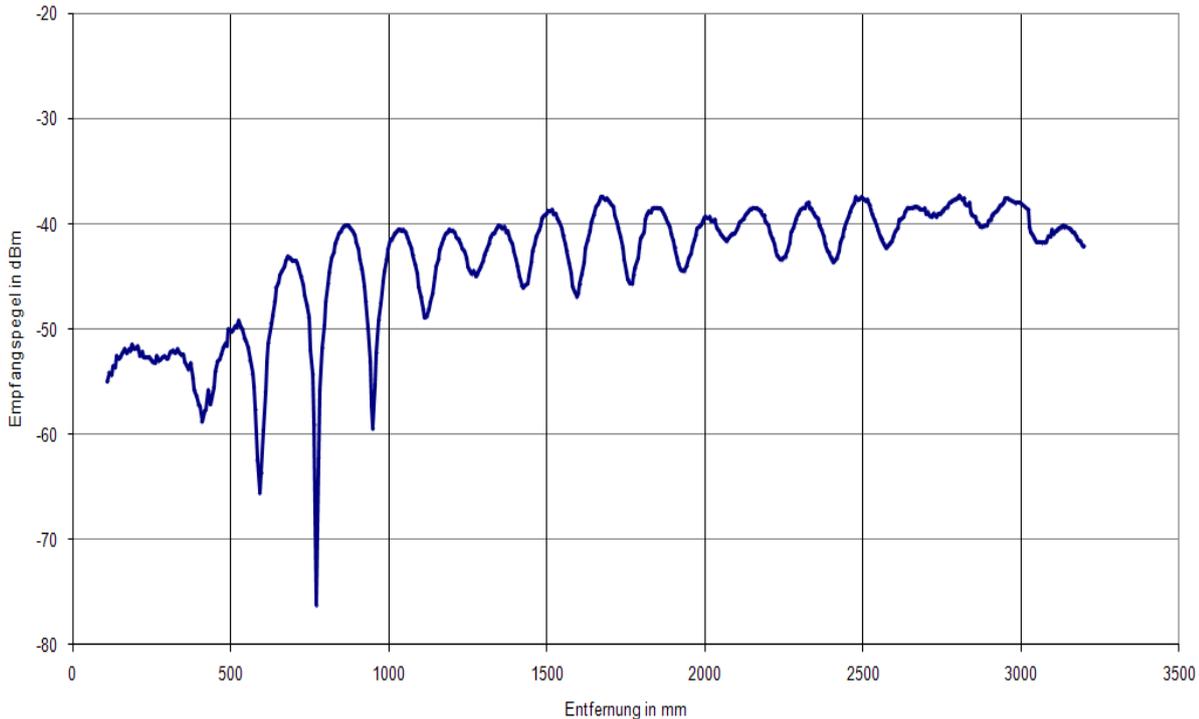


Abbildung 2-7: Schwankung der Feldstärke entlang einer Kabelantenne (Messung am fml)

VDI/AIM 4472-10

Beim Verfahren nach VDI 4472 Blatt 10 werden bezüglich des Lesefeldes lediglich Informationen zur Lesbarkeit eines Transponders erfasst. Ist die minimale Feldstärke zur Kommunikation mit dem bzw. den verwendeten Transpondern bekannt, so kann daraus abgeleitet werden, ob die Feldstärke an den Messpunkten kleiner, gleich bzw. größer dieser Feldstärke ist. Ist die Minimalfeldstärke nicht bekannt, kann nur eine Aussage zur Lesbarkeit des bei der Messung verwendeten Transponders getroffen werden. Für andere Typen von Transpondern oder auch anderen Transpondern des gleichen Typs, die produktionsbedingt eine andere minimale Feldstärke aufweisen, würde sich das Messergebnis dementsprechend anders darstellen. Problematisch und wahrscheinlich ist vor allem die mögliche Erweiterung des Lesebereichs eines Erfassungsaufbaus, wenn Transponder zum Einsatz kommen, die einen niedrigeren Energiebedarf und eine niedrigere Ansprechfeldstärke aufweisen. Dies trifft überwiegend auf Transponder neuerer Generationen zu. Der erweiterte Lesebereich birgt die Gefahr von sogenannten „False-Positive“-Erfassungen. Dabei handelt es sich um ungewollte Transpondererfassungen außerhalb des gewünschten Lesebereichs. Gerade bei der Erkennung dieser Fehlerquellen sollen die im Forschungsprojekt entwickelten Konzepte helfen können. Z. B. kann eine gezielte Darstellung der relevanten Stellen im elektromagnetischen Feld am UHF-Aufbau erfolgen, welche Feldstärkewerte im Bereich der Minimalfeldstärke aufweisen.

2.2 Verfahren und Systeme zur Ermittlung der Feldverteilung

Die Limitation der Lesereichweiten liegt beim Großteil der derzeit üblichen Transponder in der Versorgung mit der notwendigen Energie aus dem elektromagnetischen Feld. Steht dem Transponder genügend Feldstärke zur Verfügung, kann er (zurück-)senden und wird aufgrund der hohen Sensitivität der Schreib-/Lesegeräte in fast allen Fällen erfasst. Diese Limitation wird deutlich durch Systeme wie dem Reader „STAR“ der Firma Mojix [Moj-2008], die mit nur einem empfangenden System antwortende Transponder aus 182 m Entfernung erfolgreich identifizieren können. Dazu muss sich aber auch hier in der Nähe der Transponder ein Sender befinden, der die Transponder mit Energie versorgt. Diese Reichweite liegt zurzeit in der Größenordnung von 10 m Abstand zwischen Transponder und Sendeantenne und ist unabhängig davon, ob es sich um ein herkömmliches RFID-System oder ein Mojix-System handelt. Damit ist die vom Sender am Ort des Transponders erzeugte Feldstärke in den überwiegenden Fällen die für die Lesung des Transponders ausschlaggebende Größe. Der Bereich, in dem diese Feldstärke ausreicht, einen Transponder zu Lesung mit Energie zu versorgen, definiert den Erfassungsbereich. Dieser könnte in Analogie zu Abbildung 2-2 visualisiert werden.

2.2.1 Bestimmung der Feldausbreitung durch Simulation

Abbildung 2-8 zeigt die Ergebnisse einer Simulation der Feldstärkeverteilung des von einer UHF-RFID-Antenne ausgestrahlten elektromagnetischen Feldes mit (unten) und ohne (oben) den Einfluss von Gegenständen in der Umgebung. Der große Einfluss der Umgebung auf die Ausbreitung des Feldes zeigt sich auch in Abbildung 2-9. Hier wird die resultierende Feldstärkeverteilung einer senkrecht in einen Raum hinein strahlenden UHF-Antenne abgebildet. Die Erstellung solcher Simulationen ist sehr aufwendig und nur mittels spezialisierten Fachpersonals möglich. Eine Messung der Ist-Situation ist unter Nutzung speziellen Equipments deutlich einfacher durchzuführen. Ein exemplarischer Vergleich einer derartigen Vollwellen-Feldsimulation mit realen Messdaten in einer statischen UHF-RFID-Erfassungssituation wird in [Hoe-2011] am Beispiel eines Gabelstaplers und einer Gitterboxbeladung dargestellt. Dabei werden die Machbarkeit und der Aufwand für eine Messung in einer 2D-Ebene gezeigt. Der Vergleich einer Messung mit der Simulation wird oft nur an wenigen Punkten durchgeführt. Nur wenn aufwendige, automatische Verfahrenssysteme zur Verfügung stehen, wird der Vergleich an mehreren Punkten durchgeführt (wie z. B. in [Sch-2003, Pre-2007, Zha-2008]).

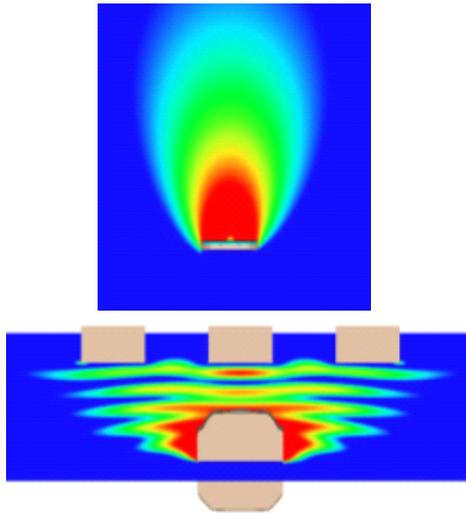


Abbildung 2-8: Simulierte Feldverteilung vor einer UHF-Antenne ohne Umgebungseinfluss (oben) und mit Einfluss durch Waren (unten) [Kat-2009]

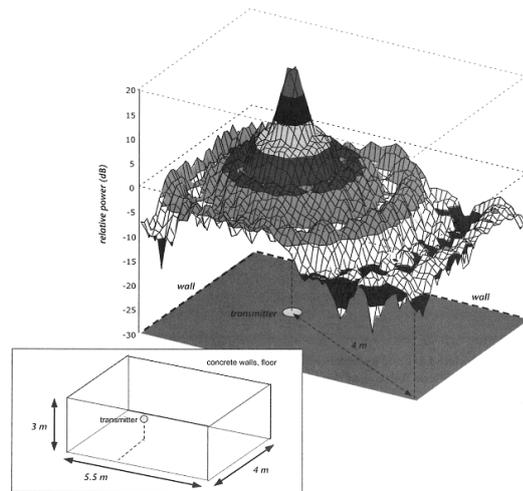


Abbildung 2-9: Visualisierung der Feldstärke eines vertikal orientierten UHF-Strahlers in einem Raum [Dob-2008]

Der rechnerische Aufwand einer Feldsimulation ist bei Finite Elemente-Simulationen von dem zu berechnenden Volumen (gerechnet in Wellenlängen) abhängig und kann durch den Einsatz von Raytracing stark gesenkt werden. Anwendungen hierbei sind in erster Linie Ausbreitungssimulationen von GSM und Fernsehen [Coi-2002, Wan-2011], aber auch UHF-RFID-Systeme in Lagerhallen können so abgebildet werden [Bos-2007, Bos-2010]. Die Ergebnisse einer Raytracing-Simulation sind deutlich ungenauer als eine Vollwellensimulation und benötigen immer noch spezielle Simulationssoftware und Experten zur Bedienung. Somit eignet sich diese Technik zwar z. B. für Interferenzsimulationen in Hallen, jedoch weniger für die im Forschungsvorhaben benötigte kleinskalige Aussage über die Feldstärke. Zudem bedingt die Vorhersage der Feldausbreitung auf Basis von Simulationen die Nachbildung der Installation und ihrer Umgebung in einem Modell. Je besser ein solches Modell der Realität entspricht, desto genauer sind die Simulationsergebnisse. Jedoch steigt hier der Aufwand für die Modellierung stark und oft sind nicht alle Details zur Umgebung vorab bekannt.

Ein mögliches Ergebnis einer 2D-Messung in einem Raum kann beispielsweise analog zu der in Abbildung 2-9 gezeigten Feldsimulation dargestellt werden. In der Intralogistik muss gerade bei kleinen Erfassungsszenarien mit vielen metallischen Aufbauten (z. B. Tunnelgate) mit Reflexionen und den damit hervorgerufenen starken Feldstärkeschwankungen gerechnet werden. Die Möglichkeit einer Vermessung der Feldstärke in einer derart hochgradig reflexiven Umgebung ist in [Hua-2004] am Bei-

spiel einer Modenverwirbelungskammer für Tests zur elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV oder englisch EMC) dargestellt.

2.2.2 Methoden und Technik zur Messung der Feldstärke

Zur Vermessung der Feldstärke an UHF-RFID-Aufbauten sind prinzipiell mehrere Möglichkeiten denkbar. Je nach Systematik und verwendeten Messmitteln ergibt sich ein unterschiedlicher hoher Informationsgewinn zum elektromagnetischen Feld. Prinzipiell können gängige passive RFID-Transponder, spezielle Feldmesstransponder oder Feldstärkemessgeräte verwendet werden.

Feldmessung mit Transpondern

Eine Feldmessung unter Nutzung von Transpondern kann wie in [VDI 4472-10] beschrieben erfolgen. Der Lesebereich wird dabei über den Leseerfolg beim Kommunikationsversuch mit dem Transponder an den jeweiligen definierten Messpunkten bestimmt. Hier wäre auch die Verwendung eines Transponderpulses denkbar, bei dem sich die Transponder an den definierten Messpunkten befinden. Über die Zuordnung der Transponder-IDs zu den Positionen könnte dadurch ein Abbild zum Lesebereich erzeugt werden. Bei dieser Art der Erfassung des Messbereichs ist das Ergebnis stark an die vom Transponder im Minimum benötigte Feldstärke gebunden. Die gewonnene Information ist also nicht ohne weiteres auf andere Transpondertypen übertragbar, da sogar zwischen Transpondern gleichen Typs Unterschiede bei der minimal benötigten Feldstärke zu bemerken sind.

Eine weitere Möglichkeit stellt das Testen der Auslesbarkeit der Transponder mit einem Vektorsignalgenerator zur Generierung der Abfragesignale und das Lesen des Transponders mit einem Spektrumanalysator dar. In [Cap-2009a] und [Cap-2009b] wird diese Methode erfolgreich zur Vermessung der eindimensionalen Feldverteilung vor einer Hornantenne genutzt. Sie unterscheidet sich in der erreichbaren Aussage wegen der größeren Genauigkeit der Leistungsmessung eines Spektrumanalysators gegenüber einem RFID-Reader nur über eine genauere Differenzierung der Feldstärke im Raum, in dem die Transponder gelesen werden können. Die gesetzliche Beschränkung der maximalen Feldstärke gilt für diese Methode genauso wie bei der Verwendung von Readern. Daher unterliegt der untersuchbare Raum den gleichen Einschränkungen, wie sie im vorhergehenden Absatz beschrieben sind. Auch hier ist keine Aussage über die Lesereichweite zukünftiger Transponder möglich.

Feldmessung mit Feldprobe-Transponder

Die Feldmessung mit Feldprobe-Transpondern unterscheidet sich von der vorherigen Methode durch die Verwendung spezieller Sensortransponder anstelle von

Standard-Logistiktranspondern. In [Red-2005] wird ein Transponder mit speziellem Design entwickelt, der die empfangene Feldstärke zurück an den abfragenden Reader sendet. Jedoch basiert dieser Sensortransponder auf der veralteten Technik EPCglobal Gen1, die global durch den deutlich mehr Möglichkeiten bietenden Standard EPCglobal Gen2 ersetzt ist. Aktuelle Reader unterstützen den Standard EPCglobal Gen1 nicht mehr, weshalb dieser Transponder nicht verwendet werden kann. In [MIT-2008] wird ein relativ kompliziert aufgebauter semiaktiver Transponder zur Erfassung der Feldstärke mit EPCGen2-Protokoll beschrieben. Die Firma NXP entwickelt für den internen Gebrauch ebenso einen Feldstärkemesstransponder und stellt die Ergebnisse einer 1D-Messung in [Mue-2009] vor. Diese Transponder befinden sich bei den beschriebenen Tests im Entwicklungsstadium und sind nicht am Markt verfügbar. In [CIS-2014] wird ein spezieller kabelgebundener Sensortransponder beschrieben, der auch kommerziell verkauft wird. Durch die Anbindung der Transponderattrappen mit Kabeln treten bereits dieselben Feldverformungen auf, die auch mit einer kabelgebundenen Messantenne auftreten.

Feldmessung mit Messantenne/-sensor

Bei der Feldmessung mittels einer Messantenne (vgl. [Ban-2007]) werden prinzipiell immer zwei Komponenten benötigt. Ein solches System besteht zum einen aus einer Messantenne zur Entnahme der Leistung aus dem elektromagnetischen Feld und zum anderen aus einer Komponente, mit der die Leistung gemessen wird. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, je nach Anforderung die passenden Komponenten einzusetzen. Es sind also verschiedene Bauformen von Antennen (z. B. eine Dipolantenne, vgl. [EPC-09b]) für die Messung denkbar. Auch triaxiale Messköpfe (vgl. [Nar-2014]) können eingesetzt werden, allerdings sind diese oft an die Verwendung herstellerspezifischer Messgeräte gebunden. Zudem gibt es auch Feldmesssonden, bei denen der triaxiale Feldsensor und die Leistungsmesselektronik in einem Gerät integriert sind [ETS-2014].

Bei der Messung mit Antennen ist, wie bei der Messung mit Feldprobe-Transpondern, damit zu rechnen, dass die Feldverteilung durch die Anwesenheit der Messsensorik das Feld geringfügig verändert [Hua-2004, MIT-2008]. Die größere Veränderung des elektromagnetischen Feldes ergibt sich nach [Hua-2004] durch die Anwesenheit der elektrischen Leitungen zur Übertragung der Leistung an das Messgerät. Für hochgenaue Messungen können Feldstärkemesstransponder zum Einsatz kommen (vgl. [ETS-2014, Nar-2014]). Oft ist dabei der Sensor selbst aus einem optoelektrischen Material, welches das elektromagnetische Feld nur gering beeinflusst. Zudem können hier die Messwerte über optische Kabel, die einen sehr geringen Einfluss auf das zu messende Feld haben, übertragen werden [Kin-2005]. Die Sonden werden bei der Messung entweder über eine Batterie betrieben oder lasergespeist.

Solche hochgenauen Feldmesssonden sind im Vergleich zur Leistungsmessung mit Messantennen mit sehr hohen Kosten verbunden. Des Weiteren gilt es die Breitbandigkeit von Feldmesssonden zu beachten. Sie ermitteln einen Feldstärkewert für deren gesamtes Frequenzspektrum. Bei einer Messung in der Praxis würde sich die ermittelte Feldstärke nicht nur auf das von der UHF-RFID-Installation ausgestrahlte Feld beziehen, sondern auch auf andere mögliche Signale, wie z. B. WLAN und Bluetooth, die in diesem Umfeld zu erwarten sind.

2.3 Trackingsysteme zur Positionsbestimmung

Die im Forschungsprojekt angestrebte Visualisierung von Lesefeldern bedingt eine Erfassung von Feldstärkewerten zusammen mit der Pose der Messsensorik zum Zeitpunkt der Messung. Für einen schnellen Ablauf der Messung sollen in kurzer Zeit viele Messdatensätze, bestehend aus Feldstärkewerten und Werten zur Pose, erfasst werden. Um dies zu realisieren, wird der Ansatz verfolgt, die Position samt Orientierung der Sensorik zur Feldstärkeerfassung zu verfolgen bzw. zu tracken. Dadurch wird eine gleichzeitige Erfassung von Feldstärke und Pose möglich. Nachdem zuvor (siehe Abschnitt 2.1 und 2.2) die verschiedenen Verfahren und Techniken zur Feldstärkeerfassung beschrieben wurden, wird im folgenden Abschnitt auf die verschiedenen Möglichkeiten zur Verfolgung bzw. Bestimmung der Pose von Objekten, respektive der Feldmesssensorik, eingegangen. Dabei findet eine grobe Unterteilung der Trackingtechnologien anhand der physikalischen Größen statt, die zur Bestimmung der Pose erfasst und ausgewertet werden. Diese Technologien finden oft in Eingabegeräten für Virtual-Reality-Systeme (VR) und Augmented-Reality-Systeme (AR) Anwendung [Dör-2013]. Im Bereich der AR-Systeme werden sie beispielsweise in der Medizin bei computer-assistierten Interventionen eingesetzt [Fra-2012, Fra-2014a].

Die Beschreibungen zur prinzipiellen Funktionsweise der einzelnen Trackingtechnologien in den folgenden Unterabschnitten erfolgen jeweils *nach Grimm et. al* in [Dör-2013].

2.3.1 Elektromagnetisches Tracking

Bei dieser Trackingtechnologie wird die elektromagnetische Induktion zur Ermittlung der Pose von Objekten genutzt, indem mittels stromdurchflossenen Spulen sich über die Zeit ändernde Magnetfelder erzeugt werden. Als Sensoren kommen ebenfalls Spulen zum Einsatz, die innerhalb des Magnetfeldes Ströme induzieren. Die Höhe der durch die Sensorspulen induzierten Ströme wird erfasst und dient der Bestimmung der Position und Orientierung der Sensorspulen im Magnetfeld. Durch die

Kombination dreier zueinander orthogonal ausgerichteter Spulen zu einem Sensor können Werte zu allen sechs Freiheitsgraden (6-DOF) ermittelt werden. [Dör-2013]

Der große Vorteil bei dieser Art von Tracking besteht nach *Franz et al.* darin, dass keine Sichtverbindung zwischen der Sensorik und dem aufgebauten Magnetfeld bestehen muss. Es werden also auch stabil Daten zur Pose des Sensors geliefert, wenn sich beispielsweise der menschliche Körper zwischen Magnetfeld und Sensor bzw. der Sensor sich im menschlichen Körper befindet. [Fra-2012]

2.3.2 Tracking mittels Inertialsensorik

Unter dem Begriff Inertialsensorik sind Beschleunigungssensoren und Drehratensensoren zusammengefasst. Entsprechend der Bezeichnungen können mit diesen Sensoren Beschleunigungen und Winkelgeschwindigkeiten gemessen werden. Durch die Integration der von den Sensoren erfassten Werte können Wege und Winkel errechnet werden. Für ein 6-DOF-Tracking werden je drei, zueinander orthogonale, lineare Beschleunigungssensoren und Drehratensensoren eingesetzt. [Dör-2013]

Bei jeder Auswertung der Sensoren werden die relativen Wege und Winkel zum vorherigen (Ausgangs-)Punkt bestimmt. Absolute Werte können erhalten werden, indem aus einer festgelegten bzw. bekannten Pose heraus mit dem Tracking gestartet wird. Somit benötigen diese Systeme zusätzlich zur Sensorik keine weiteren Gerätschaften oder Infrastruktur. Die Sensorik kann zudem sehr klein und leichtgewichtig sein [Fra-2014b].

Beim Tracking mittels Inertialsensorik ergibt sich nach *Tönnis* ein wesentlicher Nachteil hinsichtlich der Genauigkeit der Messung. Da jeder der Messwerte einem Fehler unterliegt und die aktuelle Position immer anhand der letzten Auswertung bestimmt wird, steigert sich der gesamte Fehler von Messpunkt zu Messpunkt. Diese Problematik wird als Drift bezeichnet und ergibt über längere Zeiträume sehr ungenaue Werte. [Tön-2010]

2.3.3 Mechanisches Tracking

Mechanisches Tracking setzt voraus, dass eine mechanische Verbindung über Stangen- und Gelenkelemente zwischen dem zu trackenden Objekt und dem Referenzkoordinatensystem vorhanden ist. Zur Berechnung der Pose werden die Winkelstellungen und ggf. Auslenkungen sowie Abstände der Elemente der mechanischen Verbindung gemessen. Mechanisches Tracking liefert sehr genaue Messwerte mit hoher Wiederholrate. [Dör-2013]

Der Bereich, in dem die Pose eines Objekts verfolgt werden kann, ist aufgrund der mechanischen Anbindung im Vergleich zu anderen Trackingtechnologien klein. Zudem kann die Mechanik die Bewegung innerhalb dieses Raumes zusätzlich einschränken.

2.3.4 Akustisches Tracking

Die Auswertung der Laufzeit- oder der Phasenunterschiede von Ultraschallwellen ist die Grundlage der Posenbestimmung bei akustischen Trackingsystemen. Durch Nutzung von je mindestens drei fest zueinander positionierten Sendern und Empfängern kann über die Auswertung der neun ermittelten Distanzen eine Bestimmung der Pose bzw. von 6-DOF erfolgen. Dabei können entweder Sender oder Empfänger am getrackten Objekt angebracht werden. Es gibt mehrere Einflüsse auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schall. Dazu zählen der Luftdruck, die Luftfeuchtigkeit und die Temperatur. Schwankungen dieser Größen können zu Ungenauigkeiten in den Ergebnissen dieser Trackingsysteme führen. [Dör-2013]

Im industriellen Umfeld sind auch Störgeräusche im Ultraschallbereich denkbar, die das System beeinflussen könnten. Solche Störgeräusche würden die Messergebnisse eines akustischen Trackingsystems extrem verfälschen und unbrauchbar machen.

2.3.5 Optisches Tracking

Es existieren verschiedene Funktionsprinzipien für optische Trackingsysteme. Ihre Gemeinsamkeit liegt in der Auswertung von Kamerabildern als Grundlage für die Bestimmung von Posen. Je nach Verfahren werden die optischen Systeme zur Erfassung und Verfolgung von Posen weiter unterteilt. Werden Marker bzw. Markierungen an das Trackingobjekt angebracht, um diese leicht im Kamerabild wiederfinden zu können, so wird von markerbasierten Verfahren oder Markertracking gesprochen. Sind keine sogenannten Marker für die Extraktion signifikanter Punkte im Videobild im Einsatz, so wird von markerlosem Tracking gesprochen. Eine weitere Differenzierung der Systeme findet anhand der Position und der Sichtweise der Kameras statt. Bei einer oder mehreren Kameras, die von außen das zu trackende Objekt erfassen, wird von Outside-In-Tracking gesprochen. Befindet sich dagegen die Kamera am verfolgten Objekt und erfasst signifikante fest stehende Punkte in der Umgebung, funktioniert das Tracking nach dem Inside-Out-Prinzip. [Dör-2013]

In Abbildung 2-10 werden das Outside-In- und das Inside-Out-Prinzip anhand des Einsatzes für AR Anwendungen veranschaulicht. Das zu trackende Objekt ist jeweils der Kopf des Benutzers.

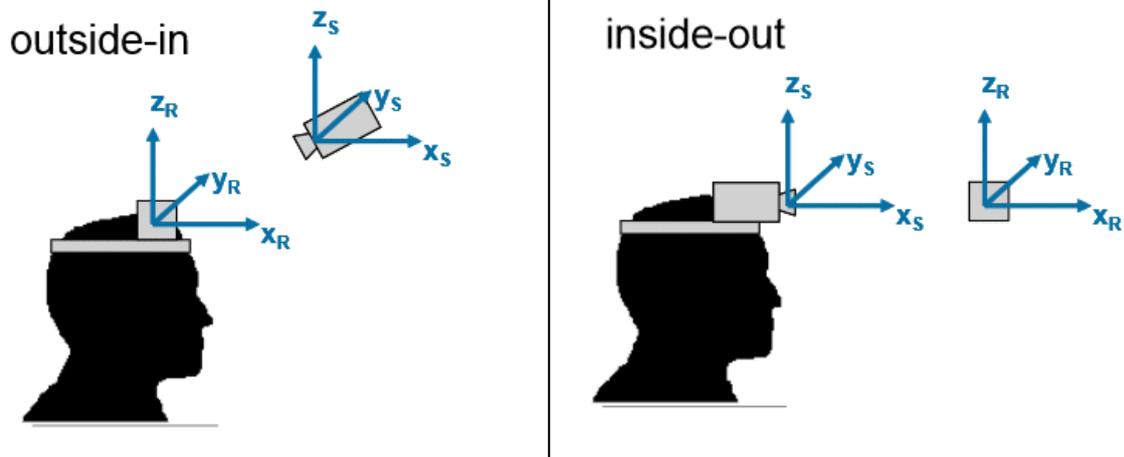


Abbildung 2-10: Outside-In- und Inside-Out-Tracking am Beispiel eines Head-Trackings (Indizes S \triangleq Sensor und R \triangleq Referenz) [Rei-2009]

Markerbasiertes Tracking

Optische markerbasierte Trackingsysteme gibt es in verschiedenen Ausprägungen. Es existieren reflektierende Marker, aktive Marker und passive, oft aus Papier bestehende, Marker mit 2D-Mustern. Systeme, die mit aktiven bzw. reflektierenden Markern arbeiten, nutzen das für den Menschen nicht wahrnehmbare Licht aus dem infraroten Spektralbereich. Bei den mit Mustern versehenen Markern wird ausschließlich sichtbares Licht verwendet. [Dör-2013]

Das Funktionsprinzip von optischen Trackingsystemen, die mit infrarotem Licht arbeiten, ist unabhängig davon, ob aktive, infrarotes Licht emittierende, Marker eingesetzt werden oder ob passive Marker genutzt werden, die das infrarote Licht reflektieren. Beide Marker erzeugen auf einem Kamerabild einen kleinen hell erleuchteten runden Bereich. Damit kann über eine Schwellwertfilterung die 2D-Position des Markers in Bildkoordinaten bestimmt werden. Wird diese Markerposition von zwei Kameras ermittelt (siehe Abbildung 2-11), deren Position und Orientierung zueinander bekannt sind, kann die 3D-Position des Markers errechnet werden. Sind nun mehrere Marker unter Kenntnis deren Position zueinander zu einem starren Körper zusammengefasst, kann die Pose (6-DOF) dieses Gebildes (auch Target genannt, siehe Abbildung 2-12) über die Auswertung der einzelnen Marker berechnet werden. [ART-2014a]

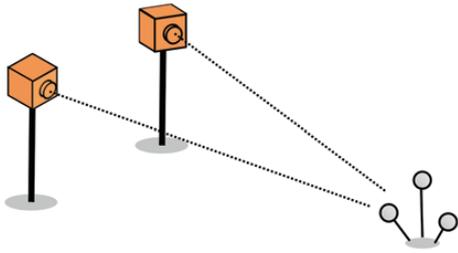


Abbildung 2-11: Erfassungssituation bei optischem Tracking mit infrarotem Licht [Dör-2013]

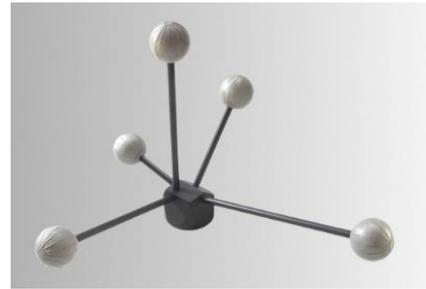


Abbildung 2-12: Target bestehend aus fünf passiven Markern [ART-2014b] (Kugeln mit retroreflektierender Beschichtung)

Auf infrarotem Licht basierendes optisches Tracking zeichnet sich, aufgrund der eigenen Lichtquelle, durch seine Stabilität bei ungleichmäßigen Lichtverhältnissen aus. Zudem liefern diese Systeme sehr genaue Werte.

Beschränkend ist bei diesen Systemen die Tatsache, dass die Marker von zwei Kameras erfasst werden müssen. Das führt zu Einschränkungen des Volumens, in dem eine Posenbestimmung erfolgen kann. Durch den Einsatz weiterer Kameras kann das Trackingvolumen erweitert werden. [Dör-2013]

Das Funktionsprinzip von optischen Systemen, die mit flachen meist auf Papier gedruckten Markierungen arbeiten, wird nachfolgend anhand von *Tönnis* Erläuterungen beschrieben. Bei dieser anderen Form des markerbasierten Trackings werden 2D-Marker eingesetzt, die Muster ohne Rotationssymmetrien aufweisen. Wie in Abbildung 2-13 zu erkennen ist, können diese, oft auch als Flachmarker bezeichneten 2D-Marker, verschiedene Formen und Muster aufweisen. Am häufigsten werden quadratische Muster eingesetzt, die von einem weißen Rahmen umgeben sind (siehe Abbildung 2-14). Zur Bestimmung der Pose des Markers muss dieser zunächst aus dem Videobild einer Kamera extrahiert werden. Dazu wird im Bild nach Kanten gesucht, die sich durch einen starken Wechsel in der Helligkeit erkennen lassen und ein Viereckmuster erzeugen. Aus den vier Eckpunkten wird dann die Neigung des Markers gegenüber der Bildebene bestimmt. Das Muster innerhalb des Markers dient dazu, den Marker genau zu identifizieren und lässt, aufgrund der Freiheit von Rotationssymmetrien, eine Ermittlung der Drehung um die Normale zur Fläche des Markers zu. Durch den Abgleich der im Bild gefundenen Kantenlängen mit den im System hinterlegten realen Kantenlängen des Markers kann die Entfernung bestimmt werden. Somit können die kompletten Posedaten errechnet werden. [Tön-2010]

Im Zusammenhang mit diesen Systemen wird die Ermittlung von Posen oftmals als Posenschätzung bezeichnet, da es sich bei der Berechnung der Posen im Bereich des Trackings genau genommen um ein mathematisches Problem handelt, bei dem 3D-Punkte auf ihre perspektivische 2D-Projektion abgebildet werden und dieses Problem über Schätzverfahren gelöst wird [Har-1989]. Entsprechend der Güte der Schätzungen entsprechen demnach die berechneten Posen mehr oder weniger den realen Werten.

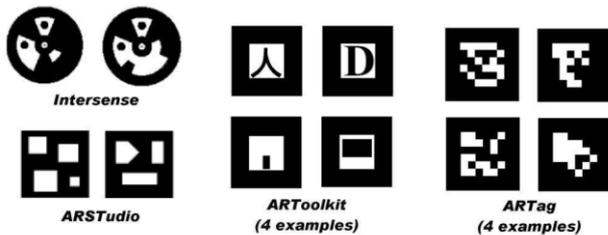


Abbildung 2-13: Marker mit 2D-Muster für Tracking (angelehnt an: [Fia-2005])



Abbildung 2-14: Flachmarker im Kamerabild

Der große Vorteil dieser optischen Trackinglösungen liegt in der freien Verfügbarkeit der benötigten Software und der Möglichkeit, beliebige Standard-Videokameras einzusetzen. Zudem kann die genaue Ausgestaltung der Systeme an die jeweiligen Anforderungen angepasst werden. Dem entgegen steht die starke Abhängigkeit dieser Trackingsysteme von den vorherrschenden Lichtverhältnissen und der geringeren Genauigkeit, die mit diesen Systemen erzielt wird. [Tön-2010]

Markerloses Tracking

Tönnis bezeichnet das markerlose Tracking als Königsdisziplin, da hier nicht auf künstliche Merkmale im Bild zur Bestimmung von Posen zurückgegriffen wird. Die Pose des zu trackenden Objektes bzw. die Pose der Videokamera wird anhand natürlicher Merkmale ermittelt. Dazu bestehen verschiedene Ansätze. Zum einen basieren diese Ansätze auf der Hinterlegung eines 3D-Modells zum Trackingobjekt im System. Zum anderen gibt es Ansätze, die auf dem Extrahieren markanter Punkte basieren. Diese markanten Merkmale werden auch Features genannt und können mit Hilfe diverser Methoden aus der Bildverarbeitung im Bild gefunden werden. Damit überhaupt Features gefunden werden können, müssen diese von der Umgebung erst bereitgestellt werden. Zusätzlich ist es sehr wichtig, eine gleichmäßige Ausleuchtung der Umgebung vorzufinden, damit die markanten Elemente stabil aus den Bildern ermittelt werden können. Zudem dürfen die Referenzelemente sich räumlich nicht verändern, da diese sonst nicht mehr zur Ermittlung der Pose dienen können. [Tön-2010]

2.3.6 Hybrides Tracking

Nach *You et al.* werden bei hybriden Trackingsystemen unterschiedliche Lösungsansätze kombiniert, um die Nachteile der jeweiligen Lösungen zu kompensieren. *You et al.* listen dabei bekannte Kombinationen von Trackingsystemen auf und verfolgen selbst den Ansatz, mit optischem Tracking die von der Inertialsensorik gelieferten Werte zu korrigieren. Die Werte der Beschleunigungssensorik werden genutzt, um den Lösungsraum für die optischen Auswertungen zu verringern. [You-1999]

Die Firma Thales Visionix Inc. bietet zwei Formen von hybriden Trackingsystemen an. Der IS-900 kombiniert Inertialsensorik mit akustischem Tracking, um auch bei nicht vorhandener Line-of-Sight zwischen Sender und Empfänger der akustischen Signale trotzdem weiterhin Werte liefern zu können [Int-2009b]. Eine Kombination von optischen Inside-Out-Tracking mit Inertialsensorik stellt das System IS-1200 dar, das eine Steigerung der Genauigkeit der Orientierungswerte verspricht [Int-2009a].

3 Analyse und Spezifikation von Anforderungen an ein System zur Lesefeldvermessung und -visualisierung

Innerhalb dieses Kapitels werden die Anforderungen an ein System, das die Messung und Visualisierung von elektromagnetischen Lesefeldern zur Bewertung der Umsetzung von UHF-RFID-Installationen ermöglicht, beschrieben. Im Folgenden wird dieses als System MobiVis bezeichnet. Aus dem Namen ist zu entnehmen, dass es sich um ein mobiles System zur Visualisierung von Lesefeldern handelt. Dazu werden die grundlegenden funktionalen Anforderungen sowie Qualitätsanforderungen und Randbedingungen an ein derartiges System ermittelt und spezifiziert. Funktionale Anforderungen werden in diesem Zusammenhang analog zum Software- bzw. Requirements-Engineering verstanden. Mit ihnen werden die Funktionen bzw. die Funktionalität beschrieben, die vom System bereitgestellt werden sollen [Poh-2011]. Funktionale Anforderungen sind unabhängig von deren technischer Umsetzung [Rob-2006]. Sie beschreiben somit, was das System können soll. Im konkreten Fall werden also die Funktionen festgehalten, welche die verbesserte Untersuchung von UHF-Lesefeldern zulassen. Die Begriffe Qualitätsanforderungen und Randbedingungen sind wiederum dem Requirements-Engineering aus der Softwaretechnik angelehnt. Mit den Qualitätsanforderungen werden die qualitativen Eigenschaften des Systems, einzelner Komponenten oder von Funktionen des Systems beschrieben [Poh-2008]. Somit geben sie an, wie das System gestaltet sein soll oder auch wie gewisse Funktionen vom System erbracht werden sollen. Bei den Randbedingungen handelt es sich um Anforderungen, die den möglichen Lösungsraum einschränken [Poh-2011].

Auf Basis der grundlegenden Anforderungen werden im Rahmen der ersten Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses die Anforderungen zum Lesefeldanalyse-System weiter konkretisiert (siehe Abschnitt 3.2). Die grundlegenden Anforderungen (siehe Abschnitt 3.1) ergeben sich aus dem formulierten Forschungsziel (siehe Abschnitt 1.2).

3.1 Grundlegende Anforderungen an ein System zur Analyse von Lesefeldern an UHF-RFID-Installationen

Die grundlegenden Anforderungen an das System MobiVis lassen sich anhand des Forschungsziels des Projekts ableiten. Dieses fordert die Entwicklung einer neuarti-

gen Methode mit zugehörigem Hardwarekonzept, die den Nutzer dazu befähigt, die Feldstärkeverteilung an einer UHF-RFID-Installation zu ermitteln und diese hinsichtlich der Erfassung von Transpondern zu analysieren. Dabei soll die neue Lösung eine Verbesserung und Vereinfachung gegenüber den Verfahren und den Systemen aus dem Stand der Technik (siehe Abschnitt 2.1) darstellen.

Dazu muss das System MobiVis die Messung der Feldstärke ermöglichen. Für ein größtmögliches Analysepotenzial und eine Übertragbarkeit der gemessenen Werte sollen diese nicht in Abhängigkeit zu einem Transponder stehen (vgl. [VDI 4472-10]). Die Feldstärke soll also tatsächlich gemessen werden und nicht aufgrund der Aktivierung von Transpondern bewertet werden. Damit die Feldstärkeverteilung erfasst werden kann, müssen zu den Feldstärkewerten zugehörige Posen vom System erfasst werden. Zugehörig bedeutet in diesem Fall, dass diejenige Pose erfasst wird, in welcher sich die Sensorik bei der Messung des Feldstärkewertes befindet. Außerdem muss durch das Gesamtsystem eine Zuordnung der gemessenen Feldstärke und Pose erfolgen. Die reine Bestimmung der Position reicht nicht aus, da die gemessene Feldstärke nur im Falle einer isotropen Messung mit speziellen Feldmesssonden nicht von der Ausrichtung der Sensorik abhängig ist. Eine Interpretation des Messwertes in Bezug auf die Lage bzw. Ausrichtung der Transponder bei der Lesung ist bei diesen Sonden jedoch nicht möglich. Dies ist auch beim Test von Portalen nach der in [EPC-09b] beschriebenen Methode, bei der ein Dipol immer nur in einer Ausrichtung verwendet wird, ein Nachteil. Ebenso ist hier die relativ geringe Anzahl an Messpunkten nachteilig (siehe Abschnitt 2.1.5). Um eine verbesserte Lösung zum Stand der Technik darzustellen, muss also einfach und schnell an möglichst vielen Punkten im Raum in unterschiedlichen Ausrichtungen gemessen werden können.

Bei den in Abschnitt 2.1 beschriebenen Standards und Verfahren sind oftmals die Umgebung, in der die Messung erfolgt, sowie die Beschaffenheit der Installationen eingeschränkt. Die im Forschungsvorhaben zu entwickelnde Methode und das dazu passende Hardwarekonzept soll es ermöglichen, im realen Umfeld der Installation Messungen zu tätigen. Durch eine schnelle und einfache Messung sollen Entscheidungsgrundlagen für die Gestaltung und Konfiguration (wie z. B. Anzahl und Ausrichtung der RFID-Antennen) von RFID-Installationen geschaffen werden.

Neben der Erfassung der Feldverteilung im Raum ist zur Analyse des Lesefeldes noch die Visualisierung der Messergebnisse notwendig. Anhand der Darstellungen zum Lesefeld soll die Bewertung der aktuellen Konfiguration der RFID-Installation erfolgen. Als Grundlage für die Darstellung der Messwerte muss deren Aufbereitung durch das System erfolgen. Um den räumlichen Aspekt auch in der Visualisierung zu

berücksichtigen, soll diese in 3D erfolgen. Dafür sind zusätzliche Möglichkeiten zur Manipulation der Ansicht vom System zur Verfügung zu stellen, um das Lesefeld in der geeigneten Perspektive betrachten zu können. Die grundlegenden funktionalen Anforderungen lassen sich anhand eines Anwendungsfalldiagramms (siehe Abbildung 3-1) zusammenfassen.

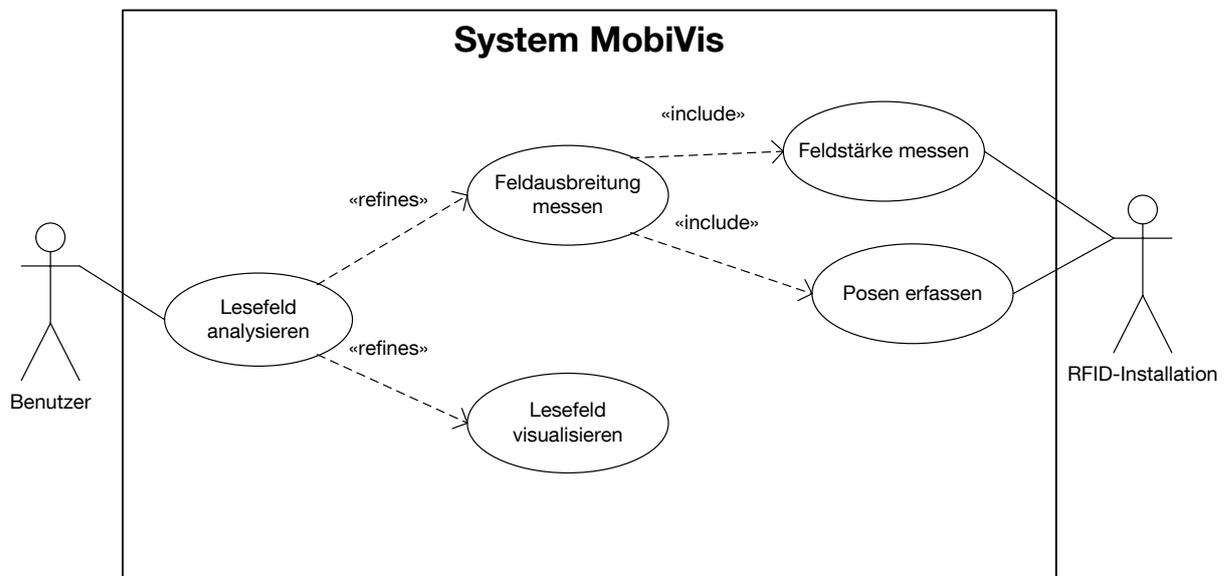


Abbildung 3-1: Anwendungsfalldiagramm zur grundlegenden Funktionalität des System MobiVis

3.2 Konkretisierung und Spezifizierung der Anforderungen

In Zusammenarbeit mit den Experten aus dem Projektbegleitenden Ausschuss werden weitere Anforderungen ermittelt und bestehende Anforderungen konkretisiert. Dafür werden im Rahmen der ersten Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses zwei Befragungstechniken miteinander verknüpft. Durch einen Fragebogen werden die individuellen Ansichten der Experten zu Funktionalität und Eigenschaften des Systems abgefragt. Die Fragebögen werden noch während der Sitzung ausgewertet und die Ergebnisse in einer gemeinschaftlichen Runde weiter hinterfragt. Dadurch kann in einigen Punkten ein Konsens geschaffen werden. Weiterhin werden durch die Diskussion der Fragen und Antworten des Fragebogens valide Anforderungen gewonnen. Anschließend werden diese weiterentwickelt und in eine Anforderungsspezifikation überführt. Im Folgenden werden die spezifizierten Anforderungen verknüpft vorgestellt. Zuvor wird noch darauf eingegangen, worin der Nutzen des Systems gesehen wird und welche Nutzergruppen sich demnach ergeben.

3.2.1 Nutzen und Nutzer des Systems

Der Hauptnutzen des Systems besteht in der Möglichkeit, Schwachstellen und Überreichweiten im Lesefeld einer Installation zu identifizieren und zu untersuchen. Das System soll dazu über dementsprechende Funktionalitäten verfügen. Zudem soll durch den Einsatz des Systems beim Optimieren und Inbetriebnehmen von RFID-Installationen Zeit gespart werden. Auch die Homogenität des von den RFID-Antennen ausgestrahlten Feldes soll mit dem System überprüft werden. Entsprechend diesem Nutzen sind RFID-Systemintegratoren sowie Hard- und Softwarehersteller für RFID-Systeme die Hauptnutzer.

3.2.2 Anforderungen zur Nutzung und Messung

Im Rahmen der Befragung der Experten werden unter anderem die zeitlichen Anforderungen an eine Untersuchung mit einem solchen System diskutiert. Nach Einschätzung der Experten soll es möglich sein, ein Lesefeld an einem Gate innerhalb eines Arbeitstages zu analysieren. Dabei ist die Zeit für den Aufbau des Systems inbegriffen.

Die geforderte räumliche Auflösung wird von den Experten mit einer Messung pro Kubikdezimeter angegeben. Diese Auflösung ist im Vergleich zum Erfassungsvolumen innerhalb eines Gates relativ hoch und dient dazu, die Identifizierung von kleineren Leselöchern zu ermöglichen. Die Genauigkeit der Positionserfassung richtet sich nach dieser Auflösung. Entsprechend dem Input eines Experten für Positionsmesssysteme sollte die Messung um den Faktor zehn genauer sein als die angestrebte Auflösung [Wei-2013]. Somit sollte die Genauigkeit der Positionserfassung bei maximaler Auflösung im Zentimeterbereich liegen.

Da mit dem System überwiegend UHF-Identifikationspunkte im Umfeld der Logistik untersucht werden sollen, wird die untere Grenze für die Feldstärke bzw. Hochfrequenzleistungsmessung anhand der Ansprechfeldstärke passiver Transponder festgelegt. Nach Analyse der Ergebnisse von Leistungsmessungen an verschiedenen Transpondern wird eine Untergrenze für die Feldstärkemessung von 0,5 V/m definiert. Weiterhin ist eine Leistungsmessung mit der Genauigkeit von 2 dB laut der Experten aus der Industrie des Projektbegleitenden Ausschusses ausreichend, um eine Beurteilung des Lesefeldes durchführen zu können.

Die mit einer Antenne gemessene Feldstärke bzw. Leistung ist von der Ausrichtung der Antenne bzw. der Sensorik abhängig. Deshalb müssen Werte zu allen sechs Freiheitsgraden der Bewegung der Antenne gemessen werden, um ihre Ausrichtung bei der Feldstärkemessung berücksichtigen zu können.

Die Messsensorik muss sich zur Erfassung des Lesefeldes möglichst uneingeschränkt durch den Raum manipulieren lassen. Damit der Untersuchungsraum flüssig und schnell vermessen werden kann, wird angenommen, dass der Anwender die Sensorik mit einem Meter pro Sekunde bewegt. Entsprechend der räumlichen Auflösung der Feldverteilungsmessung müssen vom System dann mindestens zehn Messungen pro Sekunde durchgeführt werden.

Um schnelle, zielgerichtete Untersuchungen zu ermöglichen, sollte das zu vermessende Untersuchungsvolumen flexibel gewählt werden können. Gegenstände in der Lesezone können das Feld verändern, deswegen ist eine Untersuchungsmöglichkeit gefordert, die eine Analyse des Einflusses der Objekte auf das elektromagnetische Feld zulässt. Es sollte somit möglich sein, auf allen vier Seiten dieser Gegenstände die Pose der Messantenne zu erfassen.

3.2.3 Anforderung an das Softwaresystem

Die wesentlichen Aufgaben des Softwaresystems (SW-System) sind die Steuerung der Hardwarekomponenten (HW-Komponenten) zur Messtechnik, die Kommunikation mit dem Benutzer über eine Benutzeroberfläche sowie die Haltung, Aufbereitung und Visualisierung der Messdaten.

Anforderungen zur Hardwaresteuerung

Das SW-System soll die HW-Komponenten über Schnittstellen ansteuern, damit sich eine Anbindung unterschiedlicher Systeme zur HF-Messung und Posenbestimmung möglichst einfach gestaltet. Durch die Schnittstellen sollen somit alle Befehle zur (Fern-)Steuerung, unabhängig von der speziellen Hardwarekomponente, bereitgestellt werden.

Anforderungen zur Messdatenverarbeitung

Die über die Schnittstellen gewonnenen Messdaten sind vom SW-System zu verknüpfen. Das heißt, die Feldstärkewerte müssen den gemessenen Posen korrekt zugeordnet werden. Außerdem müssen dabei unvollständige Datensätze ausgefiltert werden. Zudem sind die Daten zur Pose ggf. auf ein frei gewähltes Koordinatensystem zu beziehen und die durch die HF-Messtechnik gewonnenen Werte müssen mit hinterlegten Kenndaten zur Messsensorik in andere Größen (z. B. Feldstärke) umgewandelt werden. Weitere Funktionen der Datenaufbereitung dienen der Visualisierungskomponente der Software.

Anforderungen an die Benutzerschnittstelle

Alle nötigen Bedienungsfunktionen wie Eingaben zur Einstellung, Vorbereitung und Durchführung der Messung müssen dem Nutzer durch die Schnittstelle angeboten werden. Eingabe- und Steuerungsmöglichkeiten zur Visualisierungskomponente müssen ebenso von der GUI bereitgestellt werden. Des Weiteren werden benötigte Anzeigen zum Messvorgang wie auch die Darstellung der 3D-Visualisierung durch die Benutzeroberfläche realisiert. Bei den Qualitätsanforderungen zur GUI wird das Hauptaugenmerk auf eine einfache Bedienung des Systems gelegt.

Anforderungen an die Visualisierungskomponente

Die Messergebnisse sollten aufgrund des räumlichen Charakters der Messung auch in 3D visualisiert werden. Um einen räumlichen Bezug zwischen den dargestellten Messwerten und der vermessenen Installation herzustellen, soll die Abbildung eines Modells zur Installation möglich sein. Übliche Funktionalitäten zur Manipulation der 3D-Darstellung wie Zoom, Drehung etc. müssen vorhanden sein. Die Visualisierung der Ergebnisse muss auf das Untersuchungsziel anpassbar sein (z. B. durch besondere Hervorhebung der interessanten Grenzwerte). Die Anzeige aktueller Messergebnisse und des Fortschritts der räumlichen Vermessung soll durch die Visualisierungskomponente in Echtzeit erfolgen.

3.2.4 Anforderungen aus den favorisierten Einsatzszenarios

Im Rahmen der Anforderungsermittlung werden ebenso die Haupteinsatzszenarios für das System MobiVis erfragt. Laut den Experten ist die Vermessung eines RFID-Gates mit dem System am aufschlussreichsten. Dennoch wird auch die Untersuchung von sogenannten Single-Read-Points als interessantes Szenario genannt. Die beiden Szenarios weichen in vielen Gesichtspunkten stark voneinander ab. Unterscheidungsmerkmale sind z. B. die Anzahl der Antennen und damit die Möglichkeiten zur Konfiguration des Systems sowie der Raum, in dem die Transponder erfasst werden sollen. Darin verbirgt sich die Anforderung nach einem skalierbaren System. Bezüglich des zu vermessenden Raums ist eine skalierbare Lösung zur Positionsbestimmung gefordert, wobei auch eine Vermessung eines großen Raums durch Unterteilung in Messungen zu Teilbereichen denkbar ist. Die Anzahl der vom System betrachteten bzw. erfassbaren Antennen muss ebenso variabel gestaltet sein.

3.2.5 Anforderungen an den hardwaretechnischen Aufbau des Systems

Das System zur Lesefeldanalyse von realen UHF-RFID-Installationen soll aufwandsarm an den Einsatzort gebracht und dort aufgebaut werden können. In Bezug auf die Transportfähigkeit des Systems MobiVis wird herausgearbeitet, dass sich das System mit manuellen Transportmitteln, wie z. B. einem Rollwagen, befördern las-

sen soll. Die Mobilität des Systems ist also nicht nur für die Messung ein wichtiger Punkt, sondern betrifft auch den hardwaretechnischen Aufbau des Systems. Das System soll sich zudem nur durch eine Person unter Einsatz weniger Hilfsmittel aufbauen lassen. Unter Berücksichtigung der geforderten maximalen Gesamtuntersuchungsdauer mit dem System wird der Zeitbedarf von einer Stunde für den Aufbau des Systems als angemessen betrachtet. Angesichts des mobilen Einsatzes, sprich der Verwendung an immer anderen Einsatzorten, ist ein robuster Aufbau wichtig. Deshalb sollten die Schnittstellen zwischen den einzelnen Komponenten sowie die Komponenten des Systems selbst den Beanspruchungen durch den Aufbau gewachsen sein. Die zu untersuchenden Installationen können sich stark hinsichtlich ihrer Ausgestaltung und der Umgebung, in der sie eingebettet sind, unterscheiden. Daher muss der Aufbau des Systems MobiVis flexibel und an die Situation anpassbar sein.

3.2.6 Überblick zu den konkretisierten Anforderungen

Nachdem die Anforderungen konkretisiert und neue hinzugekommen sind, ist das Anwendungsfalldiagramm aus Abbildung 3-1 dementsprechend zu erweitern. Das erweiterte Anwendungsfalldiagramm (siehe Abbildung 3-2) bietet zugleich einen Überblick über die funktionalen Anforderungen an das System MobiVis. Die zugehörigen Qualitätsanforderungen und Randbedingungen sind in den vorhergehenden Unterabschnitten von Abschnitt 3.2 spezifiziert.

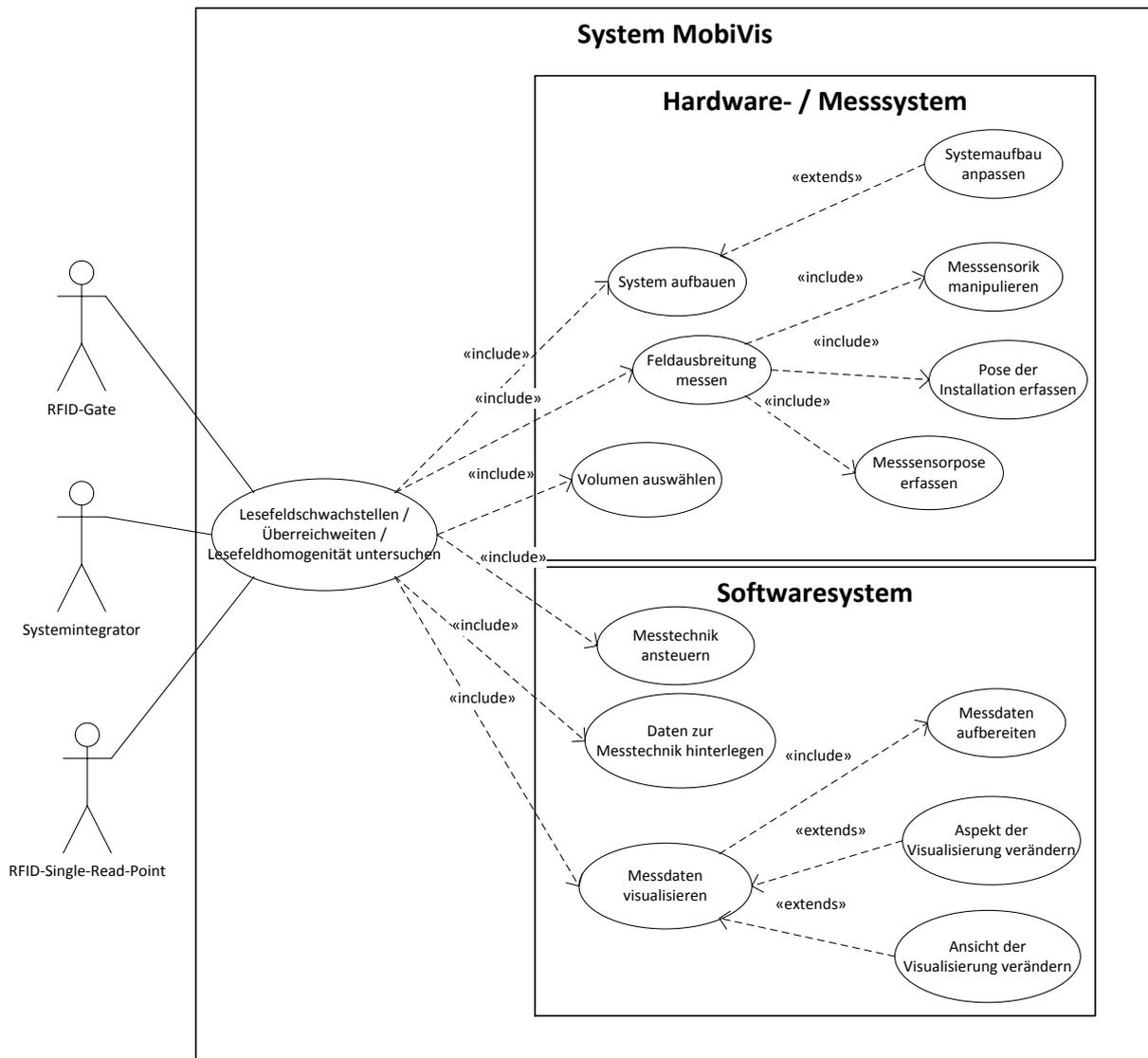


Abbildung 3-2: Anwendungsfalldiagramm nach Konkretisierung und Ermittlung der Anforderungen

Es ist zu beachten, dass Anforderungen während des Entwicklungsprozesses sich verändern bzw. detailliert werden können [Poh-2011]. Die in diesem Kapitel erarbeiteten Anforderungen stellen jedoch die Grundlage für die weiteren Entwicklungsarbeiten dar.

4 Entwicklung eines Lesefeldmesssystems

Abbildung 4-1 zeigt das komponentenbasierte Grundkonzept zum System MobiVis. Dieses unterteilt sich in Hardwarekomponenten zur Erfassung der Messdaten und in Softwarekomponenten zur softwaretechnischen Auswertung, Aufbereitung und Visualisierung dieser Daten. Die Grundlage für die Entwicklung der Systemkomponenten schaffen die Anforderungen aus Kapitel 3. In diesem Kapitel wird die Entwicklung des Lesefeldmesssystems behandelt. Dafür werden zwei Varianten des Messsystems erzeugt. Mit dem Aufbau eines Referenzsystems aus Komponenten des Standes der Technik (siehe Abschnitt 4.1) wird die Erfassung von Referenzwerten zur späteren Bewertung der kostengünstigen Version des Messsystems ermöglicht. Zudem fließen die Erkenntnisse aus der Entwicklung und dem Test des Referenzsystems in die Entwicklung der Low-Cost-Lösung (siehe Abschnitt 4.3) ein. Das Softwarekonzept wird in Kapitel 5 detailliert beschrieben, wobei in Abschnitt 4.1.3 kurz auf die Software zum Test des Referenzsystems eingegangen wird.

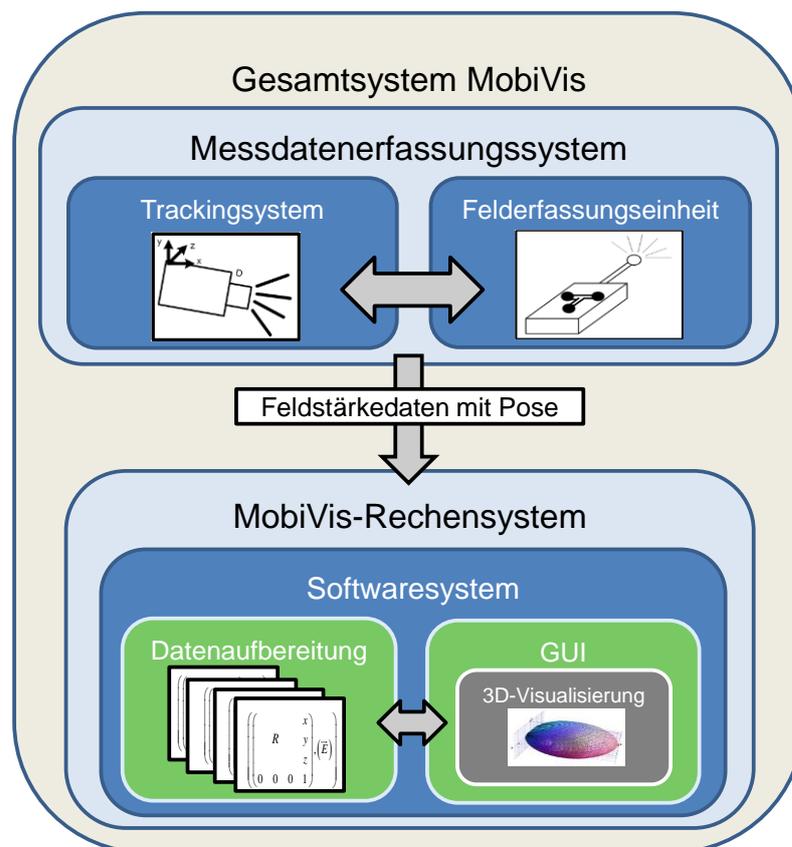


Abbildung 4-1: Schematische Darstellung zum Gesamtsystem MobiVis zur Lesefeldanalyse

4.1 Entwicklung eines Referenzlesefeldmesssystems

Zum Aufbau des Referenzlesefeldmesssystems wird der Stand der Technik der messtechnischen Komponenten hinsichtlich der Eignung für das System MobiVis bewertet. Die Kriterien zur Bewertung liefern die in Kapitel 3 spezifizierten Anforderungen. Die Bewertung bildet jeweils die Grundlage zur Auswahl der Komponenten der HF-Messtechnik sowie des Trackingsystems, mit denen das Referenzmesssystem aufgebaut wird. Bei der Auswahl der State-of-the-Art-Komponenten spielt zudem die Qualität der gelieferten Messdaten eine wesentliche Rolle, da diese später die Referenz zur Bewertung der Messdaten vom Low-Cost-System darstellen.

4.1.1 Bewertung und Auswahl des Referenztrackingsystems

Aus den in Abschnitt 3.2 spezifizierten Anforderungen lassen sich die nachfolgenden Hauptkriterien für eine Bewertung des Systems zur Messung der Pose ableiten:

- erreichbare Genauigkeit
- Größe und Ausprägung des Messvolumens
- Einfachheit und Schnelligkeit des Aufbaus
- Robustheit gegenüber den Bedingungen im industriellen Umfeld
- Wiederholrate (Updaterate) der Messungen
- Flexibilität in Bezug auf das Tracking der Feldmesssensorik

Akustisches Tracking

Das Trackingvolumen akustischer Systeme wäre für die Anwendung an einem UHF-RFID-Gate ausreichend. Akustische Systeme benötigen zur Messung der Pose eine Line-of-Sight, obwohl sie nicht derart anfällig gegenüber Verdeckungen sind wie optische Systeme [Wei-2002]. Trotzdem sind diese Systeme dem Prinzip nach einfach aufzubauen und ausreichend flexibel in der Nutzung bezüglich der Manipulation der Feldstärkemesssensorik. In den Bereichen Genauigkeit und Messwiederholrate weisen sie keine optimalen Eigenschaften auf. Der entscheidende Nachteil bei akustischen Trackingsystemen liegt jedoch in der mangelnden Robustheit beim Einsatz im industriellen Umfeld. Erfahrungsberichten eines Experten für Trackingsysteme zufolge ist die Beeinflussung der Systeme durch Störgeräusche trotz der Nutzung von Ultraschall nicht zu unterschätzen [Wei-2013]. Im Fall von akustischen Störsig-

nalen in der Einsatzumgebung sind starke Verfälschungen der Messwerte zu erwarten. Darüber hinaus führt der Einfluss der Temperatur auf die Schallgeschwindigkeit zu einer geringeren Genauigkeit [Wel-2002]. Die Absorption der Schallwellen in Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit kann je nach Frequenz ebenso ein entscheidender Faktor sein [Wel-2002]. Entsprechend der Anforderung, das Lesefeldmesssystem im Umfeld der realen Installation einzusetzen, sind akustische Systeme aufgrund der oben erwähnten Eigenschaften nicht geeignet.

Tracking mittels Inertialsensorik

Das Tracking mittels Inertialsensorik ist in vielerlei Hinsicht sehr gut für den Einsatz im System MobiVis geeignet. Die benötigte Sensorik ist sehr klein und benötigt keinerlei weitere Infrastruktur [Wel-2002]. Lediglich eine geeignete Möglichkeit zur Kommunikation bzw. zum Auslesen der Sensorik wäre zusätzlich nötig, um auf Basis von Inertialsensorik ein Tracking der Feldmesssensorik zu realisieren. Inertialtracking weist somit in den Kriterien zum Aufbau und in der Flexibilität, die sich bei der Bewegung der Feldmesssensorik ergibt, sehr gute Eigenschaften auf. Auch hinsichtlich der anderen Kriterien ist diese Art des Trackings sehr gut geeignet. So ist das Messvolumen aufgrund der nicht benötigten Infrastruktur praktisch beliebig groß und die Sensoren liefern in sehr hoher Frequenz neue Werte. Der entscheidende Nachteil ist, dass Tracking mittels Inertialsensorik einem zeitlich akkumulierenden Fehler, auch Drift genannt, unterliegt. Schon nach relativ kurzer Zeit werden von derartigen Trackingsystemen Werte mit einer mangelhaften Genauigkeit geliefert [Wel-2002]. Angesichts der erwarteten Messzeit für die Untersuchung eines UHF-RFID-Gates in der geforderten Auflösung werden die von diesen Systemen gelieferten Werte zu ungenau.

Elektromagnetisches Tracking

Bei elektromagnetischen Trackingsystemen werden Posen erfasst, indem die induzierten Ströme innerhalb eines magnetischen Feldes gemessen werden. Dabei wird von einer ungestörten Ausbreitung des Feldes ausgegangen. In elektrisch leitfähigen Gegenständen innerhalb des Trackingfeldes werden jedoch Wirbelströme induziert, die das Feld auf unbekannte Weise verändern. Diese Veränderung führt zu falschen Werten durch das Trackingsystem. Zwar gibt es Möglichkeiten, den Einfluss leitender Objekte im Trackingraum durch entsprechende Kalibrierungsverfahren zu vermindern, aber oft gestaltet sich dies als sehr schwierig und aufwendig. Elektromagnetisches Tracking ist daher für den Einsatz in logistischem bzw. produktionslogistischem Umfeld ungeeignet, obwohl andere Eigenschaften durchaus für die Nutzung dieser Technologie sprechen würden. Die Sensoren dieser Systeme sind klein und würden daher die Bewegung der Messsensorik nicht einschränken. Zum Tracking ist hier im Gegensatz zu optischen und akustischen Systemen keine Line-

of-Sight notwendig, was wiederum der flexiblen Manipulation der Messsensorik zugute kommt. Oft sind elektromagnetische Trackingsysteme kabelgebunden. Dies schränkt neben möglichen Verfälschungen des elektromagnetischen Feldes auch das Messvolumen ein.

Mechanisches Tracking

Durch die Verbindung eines Basiskoordinatensystems über mehrere mechanische Elemente und Gelenke mit einem Objekt kann dessen Pose genau ermittelt werden. Dazu müssen die Gelenkstellungen gemessen werden und die Geometrien der Verbindungselemente bekannt sein. Durch die mechanische Verknüpfung ist der Raum, in dem ein Objekt bewegt und somit dessen Pose erfasst werden kann, aber stark eingeschränkt. Je größer der benötigte Messraum ist, desto größer muss auch der entsprechende mechanische Aufbau sein. Aufgrund dieser Beschränkungen lässt sich ein derartiges Trackingsystem nicht sinnvoll im Messsystem zum Forschungsvorhaben einsetzen.

Optisches Tracking mit Papiermarkern (Inside-Out-Prinzip / Outside-In-Prinzip)

Optisches Tracking mit Papier- bzw. Flachmarkern kann die meisten Anforderungen an das Lesefeldmesssystem prinzipiell erfüllen. Grenzwertig ist bei diesen Systemen die Genauigkeit. Sie hängt dabei von der konkreten Umsetzung des Systems ab. Außerdem ist die Erkennung der Marker von den Lichtverhältnissen abhängig. Dies könnte beim praktischen Einsatz in einer Lagerhalle die Funktionsfähigkeit beeinträchtigen. Das Messvolumen dieser Systeme ist von der Größe der verwendeten Marker, der Belichtung und der Güte der Kamera abhängig. Maßgeblich ist also, auf welche Entfernung die Markierung noch aus dem Bild der Kamera extrahiert werden kann. Bei entsprechender Ausprägung des Systems ist daher ein ausreichendes Messvolumen zu erreichen. Der Aufbau eines optischen Trackingsystems mit Papiermarkern ist abhängig vom angewendeten Prinzip. Der Aufwand zum Aufbau der Systeme ist dennoch bei beiden Ausprägungen (Inside-Out / Outside-In) annehmbar. Die Flexibilität in der Bewegung der Feldstärkemesssensorik ist noch stärker davon abhängig, ob sich die Kamera (Inside-Out) oder die Markierung (Outside-In) am getrackten Objekt befindet. Da beim Inside-Out-Tracking die Kamera an der Feldstärkesensorik befestigt wird, ist hier während der Bewegung der Feldmesssensorik beständig darauf zu achten, dass die Kamera dauerhaft einen Marker erfasst. Dies erschwert die Arbeit mit dem Lesefeldmesssystem enorm.

Bei beiden Funktionsprinzipien bestehen die Systeme aus günstigen Kameras und auf Papier gedruckten Markern. Zum Tracking mit den Systemen kann dann eine kostenfreie Softwarebibliothek eingesetzt werden. Dies spricht für eine sehr kostengünstige Variante und eine mögliche Weiterentwicklung zu einem Low-Cost-System.

Optisches Tracking basierend auf infrarotem Licht (IR Tracking)

Optische Trackingsysteme, die sich zur Ausleuchtung der Szene dem infraroten Licht bedienen (IR Tracking-Systeme), sind wesentlich genauer als jene, die mit Papiermarkern arbeiten. Bei IR Tracking-Systemen werden einzelne Elemente (meist kleine Kugeln) mit einer retroreflektierenden Beschichtung umhüllt, die besonders stark das infrarote Licht reflektieren. Diese einzelnen Elemente werden Marker genannt. Mehrere dieser Marker ergeben in fester Verbindung zueinander ein sogenanntes Target. Durch die Information zur Struktur des Targets können von einem IR Tracking-System Informationen zu dessen Pose ermittelt werden. Der Grund für die höhere Genauigkeit gegenüber den Papiermarkern liegt größtenteils in der Auswertung der Kamerabilder. Die retroreflektierenden Marker erzeugen stark erhellte Punkte im Bild, die sich sehr gut segmentieren lassen. Diese Segmentierung ist sehr viel genauer als die Ermittlung der Eckpunkte von Papiermarker (siehe Abschnitt 2.3.5) in einem Videobild. Die Pose wird über die aus den Bildern ermittelten 2D-Koordinaten der Marker berechnet. Da die 2D-Koordinaten bei IR Tracking-Systemen genauer bestimmt werden können, ergibt sich auch eine höhere Genauigkeit bei der Bestimmung der Pose. Die Frequenz, mit der diese Systeme Messdaten liefern, hängt von der Anwendung ab, für die sie ausgelegt sind. Für die Anwendung im Lesefeldmesssystem sind 60 Hz, wie sie von Systemen erbracht werden, die als Eingabegeräte für Augmented- und Virtual-Reality dienen, ausreichend. Wie einfach sich diese Systeme in Betrieb nehmen lassen ist vom jeweiligen Konzept abhängig. Für ein Tracking mit Infrarotlicht werden zwei Kameras benötigt, deren Pose zueinander bekannt sein muss. Hier existieren zwei Ansätze. Einer davon ist, zwei Kameras in festem räumlichem Bezug in einem Gehäuse zu verbauen. Diese Stereokamerasysteme (siehe Abbildung 4-2) müssen nur aufgestellt werden und können dann sofort Messdaten liefern. Der vom System abgedeckte Messraum (siehe Abbildung 4-3) ist dabei fix. Hinsichtlich des Aufwandes bei der Inbetriebnahme sind diese Systeme optimal.



Abbildung 4-2: IR Tracking-System mit Stereokameraansatz [ART-2014c]

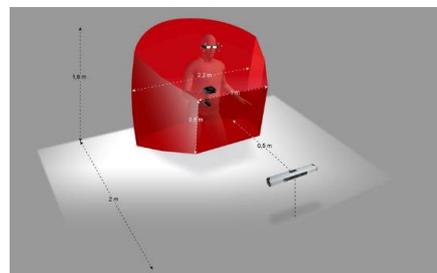


Abbildung 4-3: Festes Messvolumen zum Stereokameratracking [ART-2014c]

Der zweite Ansatz ist, die Kameras getrennt voneinander aufzustellen und mittels eines Kalibriervorganges die Posen der Kameras zueinander zu ermitteln. Der Kalibriervorgang ist dabei einfach und schnell auszuführen. Bei diesen Systemen ist

das Messvolumen flexibel und ergibt sich aus der Überschneidung der Volumen, die von den einzelnen Kameras erfasst werden. Allerdings ist es hier genauso möglich, die Kameras in fester Position zueinander zu montieren und anschließend räumlich zu kalibrieren, um die Montageposen zu ermitteln. Danach ist der Einsatz des Systems analog zu Stereokamerasystemen möglich, solange die Pose der Kameras zueinander nicht verändert wird. IR Tracking-Systeme haben somit gute Eigenschaften was den Aufbau bzw. die Inbetriebnahme betrifft. Zudem kommt bei Systemen mit Einzelkameras die Möglichkeit der Skalierbarkeit des Messvolumens durch den Einsatz von mehr oder weniger Kameras hinzu.

Die Robustheit, mit der diese Systeme Messwerte liefern, ist aufgrund der Beleuchtung des Messraums mit infrarotem Licht sehr gut. Die Marker ergeben unabhängig vom Umgebungslicht immer sehr deutlich erkennbare bzw. gut segmentierbare Bereiche auf den Bildern und ermöglichen somit bei den meisten Lichtverhältnissen eine Messung. Problematisch könnte bei diesen Systemen allenfalls eine zu hohe Einstrahlung von infrarotem Licht aus anderen Quellen sein. Ebenso könnten Reflexionen des IR-Lichtes von anderen Gegenständen die Funktion des Systems in seltenen Fällen beeinträchtigen.

Hybride Trackingsysteme

Hybride Systeme kombinieren optische oder akustische Trackingsysteme mit Inertialsensorik. Die Bewertung von hybriden Trackingsystemen kann somit aus den Bewertungen der Einzelbetrachtungen dieser Technologien gewonnen werden. Die Genauigkeit resultiert entweder aus den optischen oder den akustischen Auswertungen der Systeme. Die Inertialsensorik sorgt zum einen für eine hohe Messwiederholrate und zum anderen für eine bessere Robustheit der Systeme, da bei Ausfall der Line-of-Sight nur über die Inertialsensorik getrackt werden kann. Die optische Hybridlösung funktioniert nach dem Inside-Out-Prinzip. Demzufolge ergeben sich die gleichen Schwierigkeiten bezüglich der einfachen Manipulation der Messsensorik, um die durch die Hybridtechnik ermöglichte Genauigkeit in Verbindung mit der hohen Messwiederholrate zu erhalten. Analog dazu verhält es sich bei der Hybridlösung aus akustischem Tracking mit Inertialsensorik. Hier wird die Genauigkeit des Systems durch das akustische Tracking bestimmt. Die Gefahr der Verfälschung der Messwerte durch Störgeräusche, Temperaturänderungen oder Schwankungen in der Luftfeuchtigkeit wirken sich nach wie vor auf die Messergebnisse aus. Daher bestehen weiterhin Einschränkungen für den Einsatz unter industriellen Bedingungen.

Überblick zur Bewertung und Auswahl des Referenztrackingsystems

Die vorhergehenden Bewertungen werden in Tabelle 4-1 zusammengefasst. Wegen des Einflusses möglicher Störgeräusche und unbeständiger Bedingungen bezüglich der Raumtemperatur und Luftfeuchtigkeit im industriellen Einsatz wird akustisches Tracking in der Kategorie Robustheit als ungeeignet erachtet. Inertialsensorik kann über den Zeitraum, in dem gemessen wird, aufgrund des Drifts in solchen Systemen nicht die geforderte Genauigkeit liefern. Die Kombination beider Systeme in einer hybriden Lösung kann zwar die Nachteile der Systeme zum Teil beheben. Trotzdem bleiben die Einflüsse auf die Auswertungen des akustischen Signals bestehen. Diese Systeme eignen sich demnach eher für einen Einsatz in geschlossenen Räumen mit konstanten Raumbedingungen. Bei elektromagnetischem Tracking wird der Kalibriervorgang beim Aufbau des Systems aufgrund des möglichen Vorkommens metallischer Objekte am Einsatzort als kritisch angesehen. Zudem sind die Systeme gegenüber Positionsänderungen dieser Objekte sehr sensibel. Daher werden elektromagnetische Trackingsysteme ebenso als ungeeignet eingestuft. Das abgedeckte Messvolumen ist bei mechanischen Trackingsystemen gegenüber anderen Trackingtechnologien sehr gering. Hier müsste bei großen Untersuchungsräumen sehr oft eine räumliche Versetzung des Systems erfolgen. Außerdem ist die Flexibilität bei der Bewegung des getrackten Objektes stark eingeschränkt. Somit ist mechanisches Tracking als System zur Posenerfassung entsprechend der Anforderungen nicht geeignet.

Tabelle 4-1: Überblick zur Bewertung der Trackingsysteme

	Genauigkeit	Messvolumen	einfacher, schneller Aufbau	Robustheit	Update rate	Flexibilität
akustisch / Ultraschall	⊕	○	⊖	✗	⊖	⊕
Inertialsensorik	✗	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕
elektromagnetisch	⊕	⊖	✗	✗	⊕	⊕
mechanisch	⊕	✗	○	⊕	⊕	⊖
Papiermarker Tracking Inside-Out	○	⊕	⊕	○	○	⊖
Papiermarker Tracking Outside-In	○	⊕	⊕	○	○	⊕
optisches Infrarot-Tracking	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕
Hybrides Tracking (akustisch/optisch) + inertial	⊕/⊕	⊕/⊕	⊕/⊕	⊖/⊕	⊕/⊕	⊕/⊖

⊕ ≙ gut geeignet; ○ ≙ geeignet; ⊖ ≙ weniger geeignet; ✗ ≙ ungeeignet

Optisches Tracking bietet entsprechend den gestellten Anforderungen das größte Potenzial, wobei Inside-Out-Tracking aufgrund des schwierigeren Handlings der Feldmesssensorik als weniger geeignet eingestuft wird als Outside-In-Tracking. Das erschwerte Handling trifft in ähnlichem Maße auf das hybride Tracking zu, welches mit optischem Tracking arbeitet. Am besten eignen sich mit infrarotem Licht arbeitende optische Trackingsysteme. Gemessen an den Anforderungen weisen sie in allen Kategorien eine gute Eignung auf. Aus diesem Grund wird ein Infrarot-Trackingsystem nach dem Outside-In-Prinzip als Referenzsystem zur Posenerfassung gewählt.

4.1.2 Bewertung und Auswahl eines Referenzfeldmesssystems

Analog zur Bewertung und Auswahl des Referenztrackingsystems werden in diesem Abschnitt die verschiedenen Techniken zur Leistungs- bzw. Feldstärkemessung aus dem Bereich der Hochfrequenztechnik betrachtet. Folgende, aus den Anforderun-

gen abgeleitete Kriterien, werden zur Bewertung der Feldstärkemesssysteme eingesetzt:

- Möglichkeiten zur Beschränkung der Bandbreite der Messung auf das UHF-RFID-Frequenzband
- Flexibilität der Messung mit den Systemen
- Handhabung der Messsensorik
- Wiederholrate der Messungen
- Genauigkeit der Messung

Zur Messung der Leistung des elektromagnetischen Feldes bzw. der Feldstärke werden im Rahmen des Forschungsvorhabens folgende drei Möglichkeiten in Betracht gezogen: Feldstärkemesssonden, Spektrumanalysatoren und reine Leistungsmessgeräte (Power-Sensoren).

Messung mit Feldmesssonden

Feldmesssonden werden in den meisten Fällen zum Testen der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV oder EMC) eingesetzt. Durch diese Tests wird einerseits sichergestellt, dass elektronische Geräte auch unter dem Einfluss von elektromagnetischer Strahlung ihre Funktion erbringen. Andererseits wird die von elektronischen Geräten ausgesendete Strahlung überprüft [Bun-2008]. In diesem Sinne messen Feldmesssonden über ein großes Frequenzspektrum, um sämtliche von einem Gerät ausgestrahlte Wellen zu erfassen. Bei der Prüfung des Einflusses elektromagnetischer Felder auf elektronische Geräte dienen sie häufig als Sensor zur Rückkopplung für die Regelung der einwirkenden Felder [Kin-2005]. Auch hier ist eine breitbandige Messung gefragt. Diese Tests werden üblicherweise in Testkammern durchgeführt. Somit herrscht keine Beeinträchtigung des Messergebnisses durch andere Quellen elektromagnetischer Strahlung.

Nach *King* sind meistens isotrope Feldmesssonden im Einsatz. Für die richtungsunabhängige Messung sind die Sonden aus drei unabhängigen Elementen zusammengesetzt, die in den drei Hauptachsen orientiert sind. Bei der Messung wird jedes Element einzeln ausgewertet. Der isotrope Wert zur gesamten Feldstärke wird jeweils über den Vektorbetrag berechnet. Des Weiteren können die auf die Achsen bezogenen Werte für Auswertungen zur Polarisation des gemessenen Feldes genutzt werden. [Kin-2005]

Durch die breitbandige Messung ist der Einsatz der Sonden zur Erfassung der Feldstärke an UHF-RFID-Installationen in industrieller Umgebung wenig geeignet. Es besteht keine Möglichkeit, durch die Zwischenschaltung zusätzlicher Bauteile den Frequenzbereich einzuschränken. Diese Sonden liefern zwar sehr genaue Messwerte. Wegen der breitbandigen Messung ist es aber nicht möglich, den Messwert auf die vom RFID-System erzeugte Strahlung zurückzuführen. Die erfassten Messwerte können sich aus den verschiedensten Funktechnologien zusammensetzen. Bei den Frequenzbereichen der meisten Sonden gehen beispielsweise WLAN-Signale mit in die Messung ein. Feldmesssonden eignen sich rein zur Messung der Feldstärke und bieten außer den Auswertungen zur Polarisierung keine Möglichkeit für eine Anpassung der Messung. Ein Vorteil von Feldmesssonden ist die hohe Wiederholrate, mit der sie die Messwerte liefern können. Außerdem sind Feldmesssonden klein. Beispielsweise gibt es Sonden mit Abmessungen von nur 75 x 75 x 75 mm [ETS-2014]. Daraus ergeben sich nicht nur eine minimale Beeinflussung des gemessenen Feldes, sondern in Bezug auf die Verwendung im Forschungsvorhaben auch gute Eigenschaften bezüglich der Handhabung der Feldsensorik. Die Datenübertragung kann dabei über Glasfaserkabel erfolgen. Dies ist eine weitere Maßnahme, mögliche Auswirkungen auf das gemessene Feld zu reduzieren. Auch die Energieversorgung sollte aus diesem Grund über Laserspeisung oder eine Batterie erfolgen.

Messung mit dem Spektrumanalysator

Mit Spektrumanalysatoren können Signale im Frequenzbereich erfasst und analysiert werden. Oft werden sie ebenso wie Feldmesssonden für EMV-Untersuchungen eingesetzt. Zur Analyse der vorherrschenden Signale in einem gewählten Frequenzbereich werden diese entsprechend der Auflösung am Spektrumanalysator in ihre einzelnen Schwingungsanteile zerlegt. Am Spektrumanalysator wird dann die Amplitude der einzelnen Schwingungsanteile über die Frequenz aufgetragen. Während Feldmesssonden nur die Signalstärke über den gesamten gemessenen Frequenzbereich liefern, kann mit einem Spektrumanalysator genau betrachtet werden, an welchen Frequenzen Störsignale oder ungewollt emittierte Signale auftreten. Im Falle der Messung an UHF-RFID-Installationen kann die Leistungsmessung an den Sendebereich der Schreib-/Lesegeräte bzw. an das UHF-Frequenzband angepasst werden. Gerade im industriellen Umfeld kann dadurch eine Beeinflussung der Messung durch andere Funkkanäle ausgeschlossen werden. Zum Empfang der zu messenden Signale können verschiedene Antennen in Verbindung mit dem Spektrumanalysator eingesetzt werden. Dadurch könnte je nach Zweck der Lesefeldanalyse die passende Messantenne mit zugehöriger Richtcharakteristik eingesetzt werden. Hochwertige Geräte wie der am Lehrstuhl fml vorhandene Spektrumanalysator von Rohde & Schwarz (vgl. [Roh-2013]) sind zwar mit ähnlichen Abmessungen wie ein Desktop-PC vergleichsweise groß, liefern dafür aber Messwerte mit sehr kleinen

Messunsicherheiten. Da solche Geräte zwar oftmals über Akkumulatoren bzw. Batterien versorgt werden können, auf Dauer aber zu schwer für den portablen Einsatz sind, muss die jeweilige Messantenne über lange Hochfrequenzleitungen an den Spektrumanalysator angebunden werden. Der Spektrumanalysator des Lehrstuhls wiegt z. B. 6 kg. Mit diesen Geräten können ausreichend viele Messwerte pro Zeiteinheit erfasst werden. Beispielsweise können mit dem Gerät von Rohde & Schwarz bis zu 80 Messungen pro Sekunde im Zero Span durchgeführt werden [Roh-2013].

Messung mit Power-Sensoren

Bei Power-Sensoren, auch Leistungsmessköpfe genannt, handelt es sich um breitbandige Leistungsmesser für hochfrequente Signale. Um mit diesen Geräten die Feldstärke zu messen, können wie bei Spektrumanalysatoren Antennen zur Leistungsaufnahme eingesetzt werden. Dies ermöglicht wiederum den flexiblen Einsatz verschiedener Messantennen mit unterschiedlichen Richtcharakteristiken. Im Power-Sensor wird dann die elektrische Leistung meist in Wärme gewandelt. Aus dieser Erwärmung wird dann der entsprechende Leistungswert berechnet [Thu-2008]. Aufgrund der Breitbandigkeit fließen bei diesen Messgeräten auch alle Signale im Umfeld der Installation mit ein. Im Gegensatz zu den Feldmesssonden, bei denen Leistungsaufnahme und Leistungsauswertung meist in einem Gerät verbunden sind bzw. die Sonde zur Aufnahme über eine spezielle Schnittstelle an das Messgerät angebunden ist, gibt es beim Einsatz von Power-Sensoren die Möglichkeit Bandpassfilter zwischenschalten. Ein Bandpassfilter sorgt dafür, dass die Signale außerhalb eines bestimmten Frequenzbandes stark abgeschwächt und damit ausgefiltert werden [Rit-2014a]. Er kann somit zur Filterung der Signale aus dem UHF-Frequenzband eingesetzt werden. Power-Sensoren gibt es in sehr kleinen Ausführungen und sie können ihre Auswertungen über USB-Schnittstellen an den Rechner weitergeben. Es handelt sich um sehr kleine und leichte Bauteile (z. B. ca 130 x 45 x 25 mm [Min-2012]), die direkt mit der Messantenne verbunden werden können. Sie können somit vom Benutzer bei der Vermessung des Lesefeldes zusammen mit der Antenne manuell durch den Raum geführt werden. Zur Abdeckung des Messraumes ist es möglich dementsprechend lange USB-Leitungen zu verwenden. Je nach Preiskategorie besitzen die Sensoren eine sehr hohe Genauigkeit und liefern Messwerte in sehr kurzen Zeitabständen. Bereits Sensoren der unteren Preisklasse können meist schon die formulierten Anforderungen an das Messsystem erfüllen.

Überblick zur Bewertung und Auswahl des Referenzfeldmesssystems

Die Tabelle 4-2 zeigt einen Überblick zur Bewertung der unterschiedlichen Systeme zur Feldstärkemessung. Feldmesssonden sind in den meisten Kategorien sehr gut für den Einsatz zur Lesefeldanalyse geeignet. Die große Bandbreite der Geräte ist jedoch für die Anforderungen im Forschungsprojekt sehr unvorteilhaft. Wie bereits

oben beschrieben gehen die Signale aus anderen Funktechnologien und die Störsignale mit in die Messung ein. Messsonden liefern isotrope Messwerte und die eingesetzte Sensorik zur Leistungsaufnahme lässt sich, wenn überhaupt, nur bedingt variieren.

Die Messung der hochfrequenten Signale mit dem Spektrumanalysator bietet viele Untersuchungsmöglichkeiten. Sogar Untersuchungen zu möglichen Störsignalen im gleichen Frequenzbereich sind mit dem Spektrumanalysator möglich. Da Antennen zur Leistungsaufnahme eingesetzt werden, bieten verschiedene Antennentypen mit unterschiedlichen Charakteristiken weitere Analysemöglichkeiten bei der Feldmessung. Power-Sensoren können sehr genaue Messwerte liefern und durch die Zwischenschaltung von Bandpassfiltern in ihrer Bandbreite beschränkt werden. Sie messen rein die empfangene Leistung. Auch hier erlaubt der Einsatz unterschiedlicher Antennen Flexibilität in Bezug auf die Untersuchungsmöglichkeiten.

Tabelle 4-2: Überblick zur Bewertung der Feldstärkemesssysteme

	Bandbreitenbeschränkung	Flexibilität der Messung	Handhabung der Messsensorik	Update rate	Genauigkeit
Feldmesssonden	X	⊖	⊕	⊕	⊕
Spektrumanalysator + Antenne	⊕	⊕	○	⊕	⊕
Power-Sensor (USB) + Antenne	über Filter	○	⊕	⊕	⊕

⊕ ≙ gut geeignet; ○ ≙ geeignet; ⊖ ≙ weniger geeignet; X ≙ ungeeignet

Zum Aufbau des Referenzmesssystems wird aufgrund der vielfältigen Untersuchungsmöglichkeiten auf einen Spektrumanalysator zurückgegriffen. Der Einsatz von Power-Sensoren ist für das zu entwickelnde Low-Cost-Konzept sehr interessant, da diese auch in preiswerten Varianten eine gute Basis für die Felduntersuchungen liefern.

4.1.3 Aufbau und Test des Referenzlesefeldmesssystems

Aufbau und Test des Referenztrackingsystems

Zum Aufbau des Referenzlesefeldmesssystems wird als Trackingsystem das TRACKPACK der Firma *Advanced Realtime Tracking* (ART) eingesetzt. Dieses System kann je nach Ausprägung mit zwei bis vier Kameras arbeiten. Für die Tests zur Stabilität der Messung in einer den realen Umgebungsverhältnissen angenäherten Umgebung werden die Kameras analog zu einem Stereokamerasystem wie in Abbildung 4-2 eingesetzt. Dazu werden die Kameras auf eine Alu-Profilschiene montiert und stehen dadurch in Lage und Position in festem Bezug zueinander. Die Profilschiene wird wiederum auf einem Kamerastativ befestigt. Dieser Aufbau (siehe Abbildung 4-4) hat den Vorteil, dass eine Raumkalibrierung nur einmal durchzuführen ist, solange die Kameras in ihren Posen zueinander unverändert auf der Alu-Schiene montiert bleiben. Die Raumkalibrierung ist der Vorgang, bei dem die Kameraposen gegenüber einem Bezugskordinatensystem, dem Weltkordinatensystem (WeltKOS), ermittelt werden. Somit ist auch die Pose der Kameras zueinander bekannt. Diese Information benötigt das System, um aus den Auswertungen der Einzelbilder der Kameras Informationen zu allen sechs Freiheitsgraden eines sogenannten Targets zu errechnen. Der Vorteil dieses Aufbaus liegt im schnellen mobilen Einsatz entsprechend einem Stereokamerasystems [ART-2014c], wobei die Reichweitenvorteile des TRACKPACK-Systems erhalten bleiben. Darüber hinaus können die Kamerapositionen bei Bedarf auf der Aluprofilschiene angepasst werden, um ein anderes Trackingvolumen zu erzeugen. Es besteht zudem die Möglichkeit, die Kameras des TRACKPACKs einzeln auf Stativen anzubringen und zum Tracking zu nutzen (siehe Abbildung 4-5). Daraus ergibt sich eine noch flexiblere Anpassung des Messvolumens und das Trackingsystem lässt sich einfacher in die Umgebung der RFID-Installation integrieren. Beim Einsatz des Systems auf diese Weise gehen die Vorteile in Bezug auf die Kalibrierung jedoch verloren.

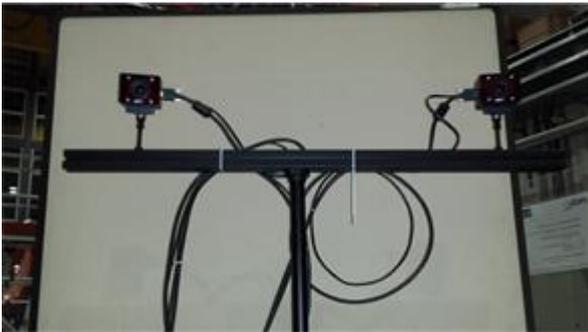


Abbildung 4-4: Anbringung der Trackingkameras auf einer Profilschiene zur Nutzung der Vorteile von Stereokamerasystemen



Abbildung 4-5: Einsatz der Kameras auf separaten Stativen

Für die Übermittlung der Daten aus den Auswertungen der 2D-Bilder in den Kameraeinheiten an den Controller wird je eine Verbindung über Firewire und Ethernet hergestellt. Über die FireWire-Verbindung wird zum einen die Stromversorgung der Kameras realisiert und zum anderen werden die Kameraeinheiten über diese Verbindung vom Controller aus gesteuert. Die Ethernetverbindung dient der Übermittlung der Daten zu den ausgewerteten Bildern. Der TRACKPACK-Controller ist die zentrale Steuer- und Recheneinheit des Systems. In ihm erfolgt die Berechnung der 6-DOF-Daten und er übernimmt die Weitergabe der Werte an weitere Applikationen. Die Kommunikation mit dem Controller findet über eine Ethernetschnittstelle statt. Dazu wird ein spezielles Software Development Kit (SDK) von der Firma ART bereitgestellt.

Als zu trackendes Objekt für die Tests zur Simulation der Messung mit dem Lesefeldanalysesystem wird dieselbe bikonische Antenne verwendet (siehe Abbildung 4-7 und Abbildung 4-9), die auch für die Messungen mit dem Referenzfeldmesssystem eingesetzt wird. Für das Tracking der Antenne wird ein Target benötigt, das in fester Verbindung mit der Antenne steht. Ein Target besteht, wie bereit in Abschnitt 2.3.5 beschrieben, aus mehreren Markern. Bei Systemen der Firma ART werden mindestens vier Marker zur Bildung eines Targets eingesetzt. Im Forschungsprojekt werden zur Bildung der Targets passive Kugelmarker verwendet.

In einem ersten Ansatz wird ein Standardtarget (siehe Abbildung 4-6) der Firma ART eingesetzt und mit einer Halterung auf der Antenne angebracht (siehe Abbildung 4-7). Anhand der Anordnung kann nach ersten Tests schnell ergründet werden, wie ein Target bzw. Antennentarget aus passiven Markern gestaltet werden kann, um bessere Werte in Bezug auf Genauigkeit und Reichweite zu erhalten.

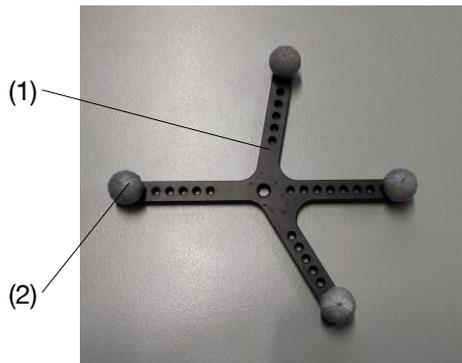


Abbildung 4-6: Standardtarget:
 (1) Standardplattform zur Montage von Markern
 (2) Kugelmarker mit \varnothing 12 mm

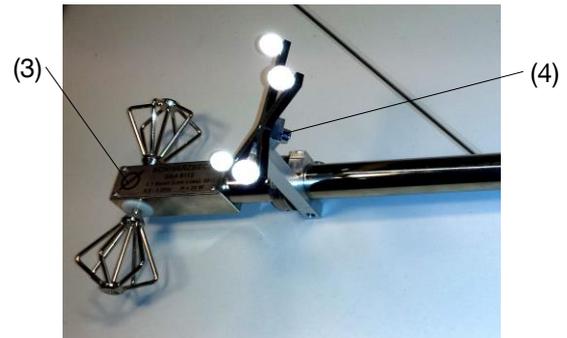


Abbildung 4-7: Aufbau zum Tracking mit dem Standardtarget:
 (3) bikonische Antenne
 (4) Targethalterung

Eine Verbesserung der Ermittlung der Pose kann durch den Einsatz eines größeren Targets mit größeren Markern erreicht werden. Die Nutzung von größeren Markern sorgt für eine größere Distanz, in der die Reflexion des gesendeten IR-Lichts ausreicht, um vom System wahrgenommen zu werden und ein Tracking zu ermöglichen. Durch die Verwendung eines Targets mit größeren Dimensionen haben die Marker eine größere Distanz zueinander. Dadurch ergeben sich bei gleichen Poseänderungen im Vergleich zu kleineren Targets größere Änderungen in den vom Trackingsystem ausgewerteten Markerpositionen. Darüber lässt sich die Genauigkeit des Systems verbessern. Bei der Entwicklung des Antennentargets (siehe Abbildung 4-8) werden diese Ansätze verfolgt. Die Anordnung der Marker zueinander entspricht der des Standardtargets. Für die Bauteile des Targets wird weitestgehend Kunststoff verwendet. Diese Maßnahme verringert den Einfluss auf das elektromagnetische Feld und die Antenne. Im Unterschied zum Standardtarget wird es direkt auf die Antenne gesteckt und mit einer Schraube fixiert, sodass keine zusätzliche Halterung nötig ist (siehe Abbildung 4-9). Mit diesem Target können die erwarteten Verbesserungen erzielt werden, ohne den Komfort beim Handling der Messantenne bzw. bei der Manipulation der Messantenne durch den Raum zu verschlechtern.

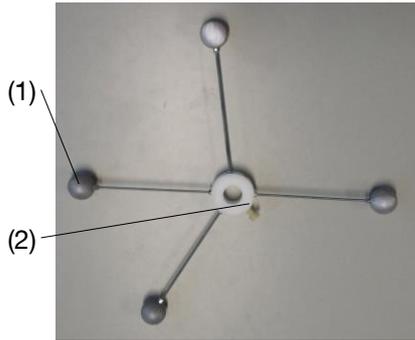


Abbildung 4-8: Antennentarget:
(1) Marker mit \varnothing 30 mm
(2) Montagering mit Fixierschraube

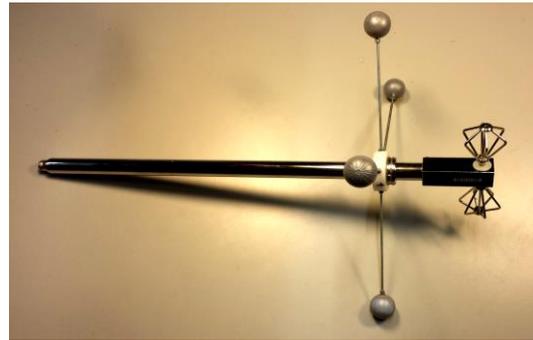


Abbildung 4-9: Antenne mit montiertem Target

Zum Test der Funktionsweise des Trackingsystems unter Bedingungen, die an reale Einsatzbedingungen angelehnt sind, wird es in der Versuchshalle der Forschungsstelle eingesetzt. Unterschiedliche Lichtverhältnisse werden simuliert, indem das System in verschiedenen Bereichen in Betrieb genommen wird. So wird der Einfluss von Tageslicht in der Nähe des Eingangstores zur Halle getestet (siehe Abbildung 4-10) und gemischte Lichtverhältnisse werden in inneren Bereichen mit wenig Tageslicht untersucht. Der Einfluss von Reflexionen wird durch metallische und IR-Licht reflektierende Gegenstände in der Umgebung betrachtet. Eindrücke zur Abdeckung des Untersuchungsraumes an einem RFID-Gate werden durch den Test des Trackingsystems am Gate-Aufbau des Lehrstuhls fml (siehe Abbildung 4-10) gewonnen.

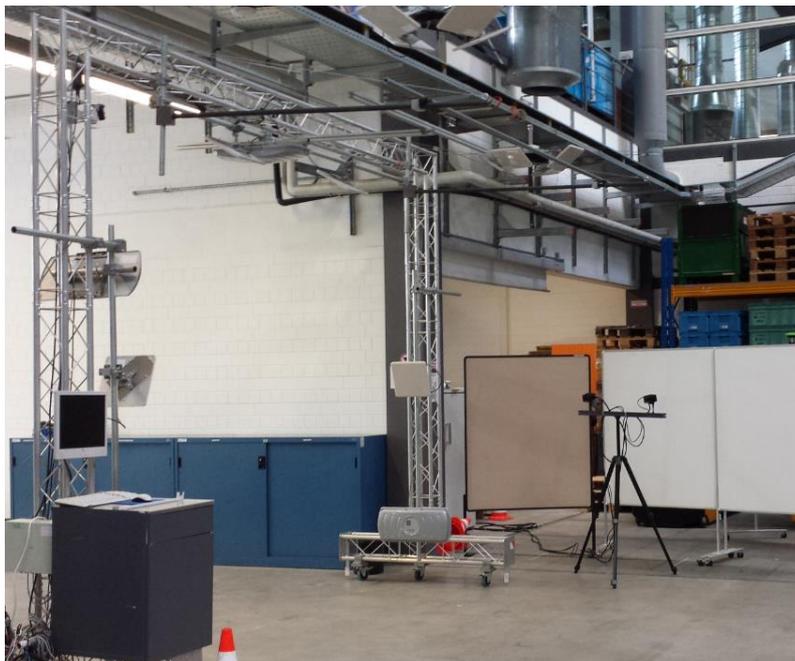


Abbildung 4-10: Test des Referenztrackingsystems unter Einfluss von Tageslicht im Bereich des Eingangstores

Das System ermöglicht insgesamt ein stabiles und genaues Erfassen der Pose der Antenne in einer an reale Verhältnisse angelehnten Einsatzumgebung. Selbst Reflexionen des IR-Lichts durch andere Objekte in der Umgebung haben keinen Einfluss auf das Tracking der Messantenne. Das System bietet sogar Möglichkeiten zur Filterung dieser statischen Reflexionserscheinungen. Lediglich bei relativ direkter Einstrahlung des Sonnenlichts kann es zu einem Ausfall des Systems aufgrund einer zu großen Anzahl detektierter Reflexionen kommen.

Aufbau und Test des Referenz-HF-Messsystems

Zum Aufbau des Hochfrequenzmesssystems wird entsprechend der Bewertung und Auswahl der Systeme zur Messung der Leistung des hochfrequenten Feldes auf einen Spektrumanalysator zurückgegriffen. Die Forschungsstelle verfügt über ein passendes Gerät vom Hersteller Rohde & Schwarz. Der mit FSL 3 bezeichnete Spektrumanalysator kann Frequenzen von 9 kHz bis 3 GHz analysieren. Die zur Leistungsaufnahme eingesetzte bikonische Antenne arbeitet im Frequenzbereich von 500 MHz bis 3 GHz und erhöht damit die Grenze des unteren Messbereichs bzw. verkleinert diesen. Zur Analyse und Messung der Signale im UHF-RFID-Band sowie der Signale in benachbarten Bändern ist dieser Frequenzbereich gut geeignet. Der Spektrumanalysator verfügt über einen Tragebügel, der den mobilen Einsatz des Gerätes unterstützen soll. Trotz des relativ geringen Gewichts (< 8 kg) des Analysators ist dieser zu schwer, um bei der Messung zur Lesefeldanalyse getragen zu werden. Dies geht aus den Anforderungen hervor, die eine Messdauer von mehreren Stunden vorsehen. Deshalb wird zur Verbindung der Antenne mit dem Spektrumanalysator ein hochwertiges, dreifach geschirmtes HF-Koaxialkabel eingesetzt. Mit der Länge von ca. 7,6 m kann mit dem Kabel ein großes Messvolumen untersucht werden, ohne den Spektrumanalysator versetzen zu müssen. Die dreifache Schirmung des Kabels sorgt für eine geringe Beeinflussung des gemessenen elektromagnetischen Feldes. Abbildung 4-11 zeigt den Aufbau zum Referenz-HF-Messsystem.

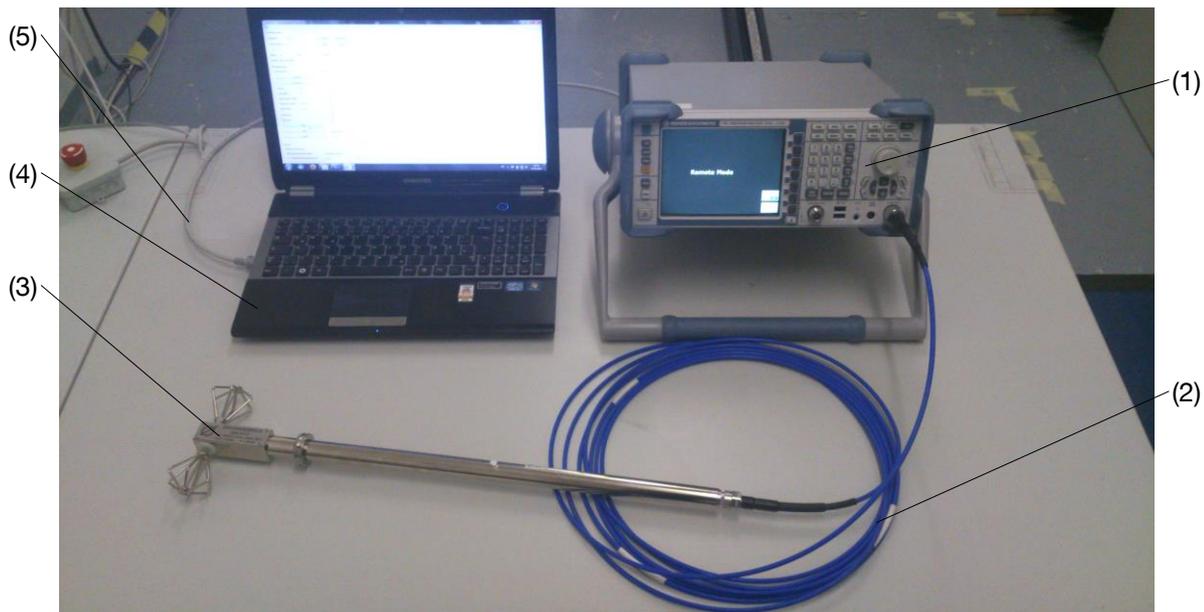


Abbildung 4-11: Aufbau zum Referenz-HF-Messsystem: (1) Spektrumanalysator R&S FSL 3, (2) High-End-HF-Koaxialkabel, (3) Bikonusantenne, (4) Rechner zur Fernsteuerung des Spektrumanalysators, (5) Ethernet-Verbindung zum Datenaustausch bzw. zur Kommunikation (angelehnt an [fml-2014])

Zur Messung mit dem Testaufbau wird ein Laptop eingesetzt, der den Spektrumanalysator über eine Ethernet-Verbindung fernsteuert. Nach der Installation der benötigten Treiber kann dazu durch die Einbindung einer bereitgestellten Softwarebibliothek über eine eigene Anwendung mit dem Spektrumanalysator kommuniziert werden. Zur Messung wird die Funktion des Gerätes zur Kanalleistungsmessung eingesetzt. Hierfür ist es ausreichend, die obere und untere Frequenz zum Band anzugeben (hier 865–869 MHz). Die restlichen Einstellungen zur Messung können vom Spektrumanalysator anhand dieser Angaben automatisch errechnet und gesetzt werden.

Die Bikonusantenne zur Aufnahme des elektromagnetischen Feldes wird aufgrund ihrer dipolartigen Richtcharakteristik eingesetzt. Diese entspricht der Richtcharakteristik vieler Transponder, da diese häufig als Antennen Dipole besitzen. Dadurch können die erfassten Messwerte gut mit diesen Transpondern und deren Orientierung verglichen werden. Der größere Frequenzbereich der bikonischen Antenne gegenüber dem Dipol ermöglicht die Identifikation anderer Signale, die bei der Messung vorherrschen.

Nach dem Aufbau des Referenzfeldstärkemesssystems wird zunächst das Sendeverhalten von UHF-RFID-Readern untersucht und die von ihnen abgegebene Signalstärke über die Zeit betrachtet. Zur Durchführung dieser Messung wird eine zirkular polarisierte Antenne von einem UHF-Reader gespeist und die Messantenne des Referenzsystems in fester Entfernung zur RFID-Antenne angebracht. Auf diese Weise

werden zwei Reader unterschiedlicher Hersteller untersucht. Zur Veränderung des Sendeverhaltens der RFID-Reader wird jeweils die herstellereigene Software zur Ansteuerung der Schreib-/Lesegeräte eingesetzt. Durch die Untersuchung der Signalstärke der RFID-Reader soll festgestellt werden, ob es jeweils eine Möglichkeit gibt, einen konstanten Signalpegel zu erzeugen. Dies ist für die Untersuchung bzw. Vermessung der Lesefelder an UHF-RFID-Installationen nötig, um ein Abbild des Lesefeldes zu bekommen, mit dem der Reader die Transponder anspricht. Abbildung 4-12 und Abbildung 4-13 zeigen die Messergebnisse zum Schreib-/Lesegerät RF670R von Siemens und dem RDU-R420 von Impinj. Die Diagramme zeigen jeweils die zeitlich konstantesten Verläufe zur Signalstärke, die an den Geräten erreicht werden können.

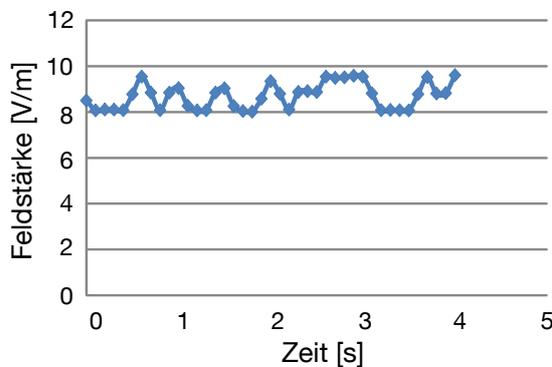


Abbildung 4-12: Zeitlicher Verlauf der Feldstärke erzeugt durch den Reader Impinj RDU-R420 im Modus Test Runs [fml-2014]

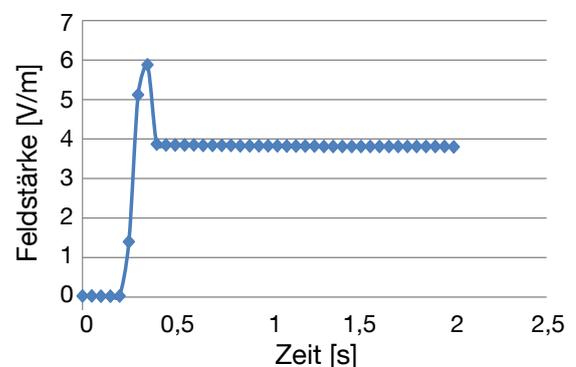


Abbildung 4-13: Zeitlicher Verlauf der Feldstärke erzeugt durch den Reader Siemens RF670R bei Testeinstellungen zur Einzelmessung [fml-2014]

Während es beim Reader von Impinj nicht möglich ist, den für die Vermessung eines Lesefeldes benötigten zeitlich konstanten Feldstärkeverlauf zu erzeugen, lässt sich dies mit dem Schreib-/Lesegerät von Siemens realisieren. Dieser Verlauf benötigt aber entsprechende Einstellungen und Parametrierungen, die nicht bei jedem Reader möglich sind. Zudem ist dieses Signal nur auf eine Länge von sechzig Sekunden einstellbar. Für die Messung bei konstanter Feldstärke wird daher bei den Tests mit dem Referenzsystem das Transponder-Testsystem *Tagformance Lite* von *Voyantic* eingesetzt. Die bereitgestellte Programmierschnittstelle des *Tagformance Lite* ermöglicht die konstante Ausgabe eines Readersignals bei eingestellter Leistung über eine eigene Anwendung. Der Feldstärkeverlauf wird durch eine erneute Messung überprüft (siehe Abbildung 4-14).

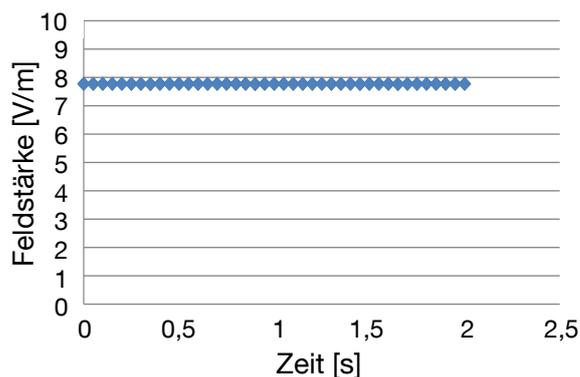


Abbildung 4-14: Zeitlicher Verlauf des Signals vom Testsystem Tagformance Lite bei Ansteuerung über die eigene Softwareanwendung

Wie am Diagramm zu erkennen ist kann mit dem Tagformance Lite ein konstantes Signal über die Zeit erzeugt werden. Bei den Untersuchungen zur Stabilität des Ausgangssignals ist eine Abweichung in der Feldstärke von nur 0,02 V/m feststellbar. Das Gerät liefert neben einem sehr gleichmäßigen Signal mit einer absoluten Genauigkeit von 1dB auch sehr genaue Werte. Dies lässt sich auf den eigentlichen Einsatzzweck des Gerätes zurückführen, nämlich der Leistungsüberprüfung von UHF-RIFD-Transpondern. Bei einem solchen Leistungstest wird die Ausgangsleistung am Gerät schrittweise (minimale Schrittweite von 0,1 dB) erhöht, bis vom Transponder eine Antwort detektiert werden kann. Die Genauigkeit des Ausgangssignals ist also maßgeblich für die Genauigkeit der Leistungstests und ist dementsprechend hoch. Daher eignet sich das Tagformance Lite vorerst gut für die Messungen mit dem Referenzsystem. Das Tagformance-System kann aufgrund seiner umfangreichen Funktionen und seiner hohen Genauigkeit im Sinne des Forschungsprojekts als State-of-the-Art- bzw. High-End-Komponente betrachtet werden. Für die Untersuchungen der UHF-RFID-Installationen reicht es aus ein kontinuierliches Ausgangssignal erzeugen zu können. Für das Low-Cost-System wird daher analog zu den Messsystemen eine kostengünstige Version zur Signalerzeugung entwickelt.

Software zur Ansteuerung der Referenzsysteme

Zum Test der Referenzsysteme wird ein vertikaler Softwareprototyp (SW-Prototyp) zur Software des Funktionsdemonstrators entwickelt. Ein vertikaler Prototyp bezeichnet die Umsetzung eines Teilaspektes einer Softwarelösung über alle Schichten hinweg [Kuh-2012]. Das heißt im konkreten Fall, dass im Prototyp bereits Funktionen zur Bedienung, Messung, Visualisierung und Datenaufbereitung und -haltung in eingeschränkter Form umgesetzt werden. Durch die vereinfachte Abbildung der Gesamtfunktionalität des späteren Lesefeldanalysesystems können im frühen Stadium schon Erkenntnisse zur Umsetzung des Low-Cost-Systems sowie der Software zum Funktionsdemonstrator gewonnen werden. Die Umsetzung eines vertikalen

Prototyps bedingt jedoch, dass die Architektur des SW-Prototyps in den Grundsätzen schon dem Aufbau der später weiterentwickelten Software zum Funktionsdemonstrator (siehe Abschnitt 5.1) entspricht. Durch die Anbindung der Hardwarekomponenten über die bereitgestellten Softwarebibliotheken können die grundlegenden Steuerungsbefehle für die einzelnen Systeme abgeleitet werden. Diese dienen im Weiteren der Entwicklung von Softwareschnittstellen zur vereinfachten Anbindung von Hardwarekomponenten. Die Schnittstellen ermöglichen es, unterschiedliche Typen von Hardwarekomponenten der gleichen Art schnell durch eine Programmierung gegen die definierten Schnittstellen verwenden zu können. Konkret wird somit in der späteren Software eine Anbindung der State-of-the-Art- und der Low-Cost-Systeme realisiert. Abbildung 4-15 zeigt einen Screenshot der Benutzeroberfläche des SW-Prototyps. Durch die Entwicklung des Prototyps werden bereits die verwendeten SW-Technologien für die Weiterentwicklungen vorgegeben. Auf diese wird im Kapitel 5 detaillierter eingegangen.

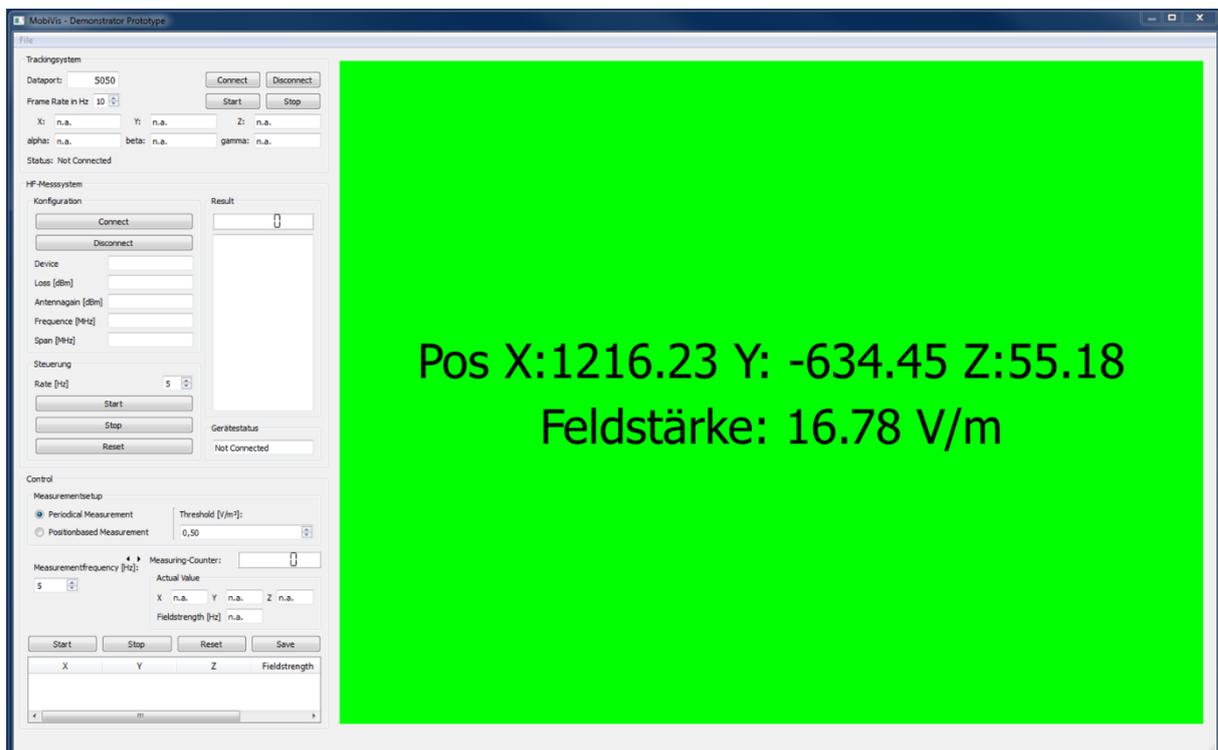


Abbildung 4-15: Screenshot der Benutzeroberfläche zum SW-Prototyp des Funktionsdemonstrators des Lesefeldanalysystems

Der Prototyp ermöglicht zum Test der Referenzsysteme sowohl eine getrennte als auch eine gemeinsame Ansteuerung der Messsysteme (Posenerfassung und Feldstärkeerfassung). Zur Berechnung der Feldstärkewerte aus den gemessenen Leistungswerten können bereits die benötigten Werte zu Dämpfungen sowie Antennenfaktoren ins System eingegeben und berücksichtigt werden. Der große Bereich auf der rechten Seite der Benutzeroberfläche dient zur Anzeige der aktuell gemessenen

Werte. Zur Analyse können die Liste der gemessenen Werte in einer Textdatei ausgegeben werden. Diese Messwertliste wird dazu verwendet, eine vereinfachte Visualisierung der Ergebnisse, wie in Abbildung 4-16 gezeigt, zu erzeugen.

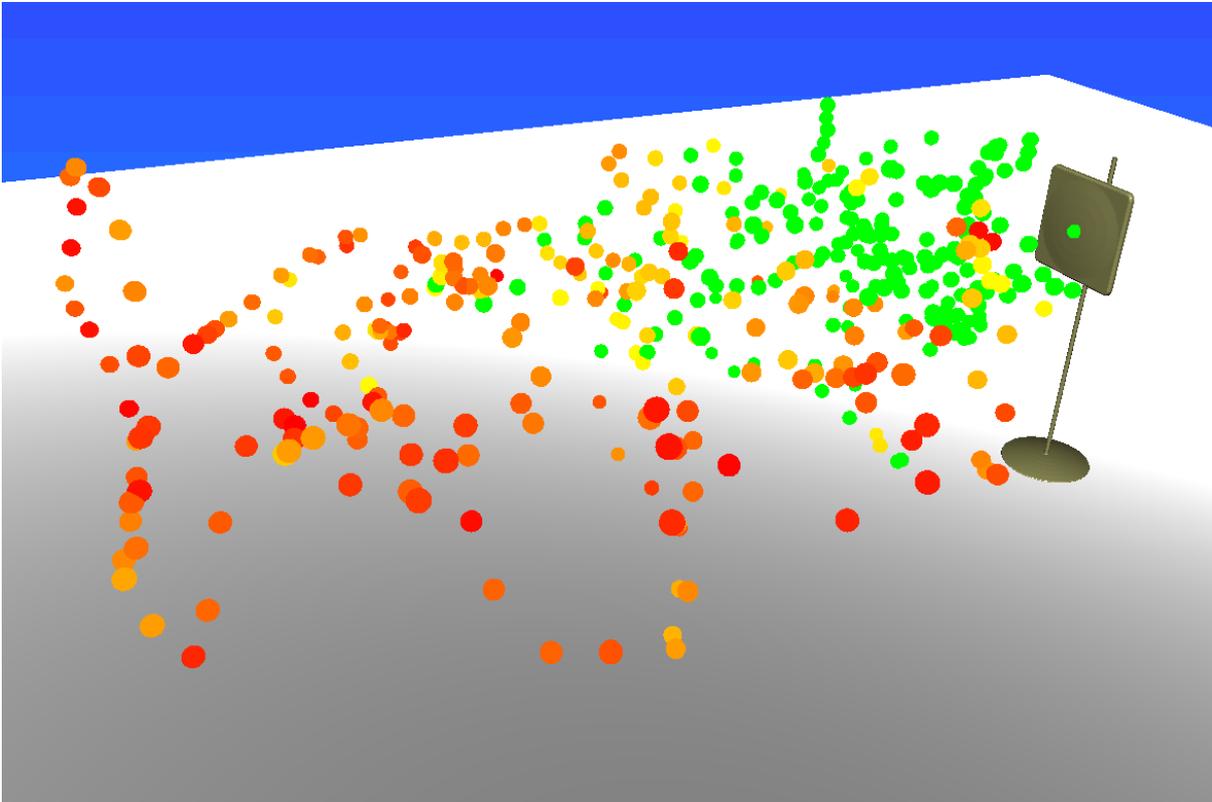


Abbildung 4-16: Vereinfachte Visualisierung der Messung auf Basis der Messdaten der Testsoftware

In der Visualisierung wird jeder Messpunkt durch eine eingefärbte Kugel dargestellt. Die Färbung der Kugel gibt dabei Aufschluss über die gemessene Feldstärke. Die Farbskala erstreckt sich dabei von grün (hohe Werte), über gelb (mittlere Werte) bis rot (niedrige Werte).

4.2 Methode zur Optimierung von UHF-RFID-Installationen durch Erfassung und Visualisierung von Lesefeldern

Die hier definierte Methode beschreibt die Vorgehensweise bei der Verbesserung von UHF-RFID-Lesefeldern durch Nutzung des System MobiVis. Diese Methode kann im Zuge von Inbetriebnahmearbeiten oder Umbauarbeiten angewendet werden. Die Art und Weise des Vorgehens ist maßgeblich für die Gestaltung und Entwicklung der Konzepte zur Messdatenerfassung, da es sich nach den benötigten bzw. zu erfassenden Daten richtet und dabei die Anforderungen aus Kapitel 3 berücksichtigt. Das Ziel der Methode ist ein verbessertes Lesefeld an einem Identifikationspunkt auf

Grundlage von Abbildern des elektromagnetischen Lesefeldes zu erreichen. Das entwickelte Vorgehen ist in Form eines Zustandsdiagramms in Abbildung 4-17 dokumentiert.

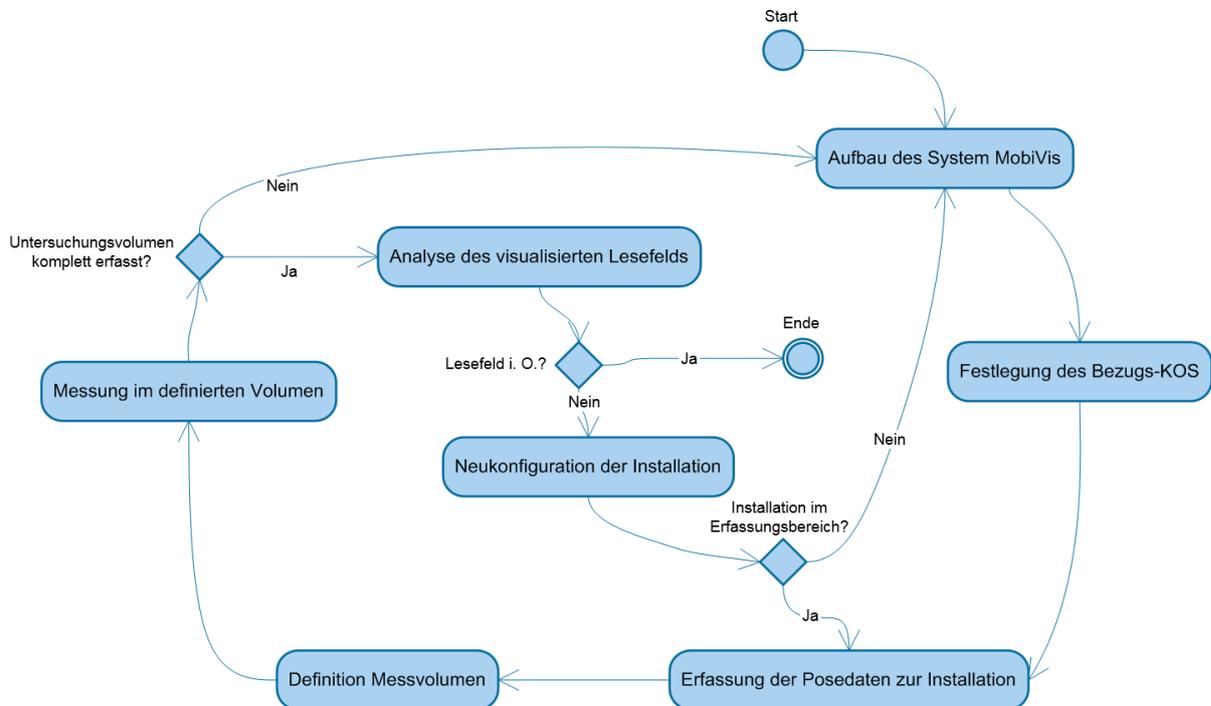


Abbildung 4-17: Vorgehen zur Optimierung des Lesefeldes an UHF-RFID-Installationen durch Messung und Visualisierung des elektromagnetischen Feldes

Die zur Analyse des Lesefeldes benötigten Daten lassen sich in zwei Kategorien unterteilen. Auf der einen Seite gibt es die Daten, die zur Aufbereitung und Auswertung der Messdaten und zur korrekten Visualisierung benötigt werden. Auf der anderen Seite gibt es die im Zuge der eigentlichen Messung erfassten Messwerte. Alle Daten werden im Verlauf der Methode nach und nach entweder erzeugt oder dem System als Eingabedaten übergeben. So können die Daten zur Zusammensetzung der HF-Messtechnik, wie Antennengewinn, Dämpfungswerte und Einstellungen zur Signalerzeugung, entweder fest im System hinterlegt sein oder beim Aufbau vom Benutzer eingegeben werden. Die Kennwerte zu den HF-Komponenten werden hauptsächlich dazu genutzt, die Feldstärkedaten aus den gemessenen Leistungswerten zu berechnen. Nach dem Aufbau des Systems an geeigneter Stelle muss ein räumlicher Bezug zwischen dem Trackingsystem und der Umgebung hergestellt werden. Dies wird mit der Festlegung eines Bezugs- bzw. Welt-KOS bewerkstelligt. Der Vorgang wird auch als räumliche Kalibrierung des Trackingsystems bezeichnet. Alle weiteren erzeugten Posedaten werden dann in Bezug auf das Welt-KOS angegeben, wobei sich das Welt-KOS über eine Koordinatentransformation beliebig verändern lässt. Nachdem das Trackingsystem zur Messung von Posen bereit ist, werden im

nächsten Schritt die Posedaten zur RFID-Installation erfasst. Die grundlegendsten Daten, die in diesem Schritt erfasst werden müssen, sind die Posedaten der UHF-RFID-Antennen. Über die Anzahl der ermittelten Posedaten ist auch die Anzahl der an der Installation befindlichen Antennen bekannt. Diese Daten sind fest mit den Messergebnissen verknüpft, da die Anzahl, die Position sowie die Ausrichtung der Antennen für das Messergebnis bzw. das sich ergebende elektromagnetische Feld ausschlaggebend sind. Falls Objekte oder Gegenstände in der Umgebung der Installation mit in die Betrachtung mit einbezogen werden sollen, sind auch deren Posen in diesem Schritt zu ermitteln. Die nächste Information, die vom System benötigt wird, ist in welchem Bereich an der Installation eine Messung erfolgen soll. Dieser Schritt ist nötig, um schnell und gezielt ausgesuchte Bereiche an der Installation untersuchen zu können. Diese Eingabe ermöglicht die Anzeige des Raumes in der Visualisierung und macht eine Rückmeldung über den Vermessungsfortschritt möglich.

Nach dieser Festlegung kann die Erfassung der eigentlichen Messdaten im soeben definierten Raum erfolgen. Hierzu wird über die Bedienoberfläche (siehe Abschnitt 5.1.3) der Software die Messung gestartet. Ab diesem Zeitpunkt werden vom Messsystem wie gefordert kontinuierlich zehn Messungen pro Sekunde ausgeführt. Es werden alle kompletten Messdatensätze bestehend aus Pose der Messantenne und der gemessenen Feldstärke aufgezeichnet. Lediglich die unvollständigen Messungen mit fehlender Pose oder Feldstärke werden verworfen. Ist die Messung mit dem System gestartet, kann der Nutzer beginnen die Messantenne manuell durch den Raum zu bewegen. Der Raum wird dazu je nach gewählter Auflösung in Volumenelemente unterteilt. Für eine komplette Vermessung des vorgegebenen Raumes muss der Nutzer eine festgelegte Anzahl an Messdaten pro Volumenelement erfassen. Dieser Vorgang wird vom System durch eine Visualisierung in Echtzeit unterstützt (siehe Abschnitt 5.3.1). Nachdem vom System eine komplette Vermessung gemeldet wird, kann die Messung gestoppt oder auch fortgeführt werden. Bei Fortführung der Messung gehen die zusätzlich gesammelten Daten ebenso in die Aufbereitung der Messdaten für die Visualisierung mit ein.

Nach der Messung stellt sich die Frage, ob das definierte und vermessene Messvolumen dem gesamten Untersuchungsvolumen entspricht. Ist dies nicht der Fall, weil das mögliche Messvolumen des Systems zur kompletten Vermessung der Interessensbereiche nicht ausreichend ist, so muss das System versetzt bzw. erneut an anderer Stelle aufgebaut werden. Ist durch das vermessene Volumen bzw. die vermessenen Volumina das Untersuchungsvolumen komplett abgedeckt, so erfolgt die Analyse der RFID-Installation durch Betrachtung der erzeugten 3D-Visualisierungen. Je nach Untersuchungsziel kann in diesem Schritt durch die Eingabe von Daten

durch den Benutzer eine Gestaltung der Visualisierung erfolgen. Z. B. kann durch die Festlegung eines Feldstärkeschwellwertes und Transparenzwerten die Darstellung von Messwerten über- und unterhalb der Schwelle angepasst werden. Repräsentiert der Schwellwert die Ansprechfeldstärke eines Transponders, so kann damit dessen Erfassung über die Visualisierung bewertet werden. Weitere Möglichkeiten zur Anpassung der Visualisierung werden in Abschnitt 5.3 beschrieben.

Entspricht das Lesefeld den Vorstellungen bzw. weist das Lesefeld keine Mängel gegenüber dem Analysezweck des Anwenders auf, so ist der Prozess beendet. Falls dies nicht der Fall ist, würden Maßnahmen zur Verbesserung der Feldausbreitung an der Installation entsprechend dem Know-How des Anwenders bzw. des Systemintegrators erfolgen. Die Installation wird dazu neu konfiguriert, d. h. die RFID-Antennen an der Installation werden neu ausgerichtet, Antennen werden hinzugefügt oder entfernt, damit Schwachstellen behoben werden bzw. eine optimale Konfiguration erreicht wird. Ist die Neukonfiguration durchgeführt, so kann je nach Erfassungsbereich direkt mit der Neuerfassung der Posendaten zur Installation begonnen werden oder das System muss erneut an geeigneter Stelle aufgebaut werden.

4.3 Entwicklung eines Low-Cost-Messkonzepts

In diesem Abschnitt werden die Konzeption und die Entwicklung kostengünstiger Systeme zur Messung von Positionsdaten sowie Feldstärkewerten zur Erfassung der UHF-RFID-Lesefelder dokumentiert. Die Entwicklung der Hardwarekonzepte orientiert sich neben den Anforderungen auch am Vorgehen bei der Lesefeldanalyse (siehe Abschnitt 4.2). Wie beim Test des Referenzmesssystems (siehe Abschnitt 4.1.3) festgestellt, ist zur Vermessung einer RFID-Installation zusätzlich zu den Komponenten für die Feldstärke- und Posenmessung (siehe Abschnitt 4.3.1) auch ein Konzept zur Erzeugung der Messsignale zu entwerfen. Das Konzept zur Erzeugung sowie zur Messung der hochfrequenten Signale wird in Abschnitt 4.3.2 beschrieben.

4.3.1 Entwicklung eines Low-Cost-Tracking-Konzepts

Die Bewertung der verschiedenen Trackingtechnologien aus Abschnitt 4.1.1 ergibt, dass sich optische Trackingsysteme besonders für die Erfassung der Pose des Feldstärkesensors bei der Messung elektromagnetischer Felder an UHF-RFID-Installationen eignen. Die Robustheit und Genauigkeit von IR Tracking-Systemen stechen hier besonders hervor. Die guten Eigenschaften dieser Systeme machen sich allerdings auch im Preis bemerkbar. So ist z. B. für das Referenzsystem ein Invest von ca. 14.000 € nötig. Im Gegensatz dazu können mit Papiermarkern arbei-

tende Trackingsysteme sehr kostengünstig realisiert werden. Der geringe Preis begründet sich in den günstigen HW-Komponenten (z. B. Webcams) und den verfügbaren SW-Bibliotheken aus dem Augmented-Reality Umfeld, die zum Aufbau dieser Systeme verwendet werden können.

Zur Realisierung eines Trackingsystems durch Auswertung von Kamerabildern existieren zwei Prinzipien, das Inside-Out- und das Outside-In-Prinzip. Beide Ansätze unterscheiden sich stark in Bezug auf die Eignung zur Erfassung der Pose der Messantenne im System MobiVis. Beim Inside-Out-Tracking (siehe Abbildung 4-18) befindet sich die Kamera am getrackten Objekt bzw. an der Messantenne und bestimmt die Pose über Marker, die im Umfeld der Umgebung angebracht werden müssen. Dies wird aus mehreren Gründen als kritisch erachtet. Die Bewegungsfreiheit der Messantenne wird bei diesem Ansatz eingeschränkt, da bei der Manipulation der Antenne somit beständig darauf zu achten ist, dass der Marker von der Kamera erfasst wird, um Posen zu erhalten. Dies stellt eine Einschränkung in der Handhabung des Gesamtsystems dar. Zwar ist es prinzipiell möglich, mehrere Marker und auch mehrere Kameras zur Minderung dieses Problems einzusetzen, diese Ansätze bergen jedoch weitere Probleme. Um absolute Posen berechnen zu können müssen fix in der Umgebung angebrachte Marker referenziert werden. Das bedeutet, es müssen die genauen Posen der Marker zueinander bzw. zu einem festgelegten Welt-KOS bekannt sein. Diese Posen müssen für jeden einzelnen Marker bestimmt werden, was einen großen Aufwand beim Aufbau eines solchen Systems bedeutet. Der Einsatz mehrerer Kameras birgt das Problem der schwierigen Anbringung. Zudem müssten die körperfesten KOS der Kameras genau bekannt sein, um die gemessenen Posen in ein gemeinsames KOS zu transferieren. Hinzu kommt die Anbindung der Kameras zur Übertragung der Bilder. Selbst bei einer Kamera würde das zusätzliche Kabel bei der Durchführung der Messung stören.

Beim Outside-In-Ansatz (siehe Abbildung 4-19) befinden sich die Marker am getrackten Objekt bzw. der Messantenne, welche sich einfacher anbringen lassen als mehrere Kameras. Ein gemeinsames Bezugs-KOS der Marker an der Antenne kann aufgrund der einfachen Vermessung der einzelnen Marker-KOS mit geringem Aufwand bestimmt werden. Durch eine geschickte Anordnung der Marker an der Messantenne und der Verwendung mehrerer Kameras werden die Einschränkungen bei der Manipulation der Messsensorik durch die Posenerfassung beim Einsatz des Systems MobiVis gemindert.



Abbildung 4-18: Skizze zum Inside-Out-Ansatz zur Erfassung der Messantennenpose

Abbildung 4-19: Skizze zum Outside-In-Ansatz zur Erfassung der Messantennenpose

Aufgrund der oben beschriebenen Merkmale der Ansätze in Bezug auf den Einsatz im System MobiVis wird im Lösungskonzept auf das Outside-In-Tracking mit Papiermarkern zurückgegriffen. Der Grundaufbau des Lösungskonzepts ist in Abbildung 4-20 dargestellt. Durch den Einsatz mehrerer Kameras und mehrerer Marker an der Antenne wird zum einen ein großes Messvolumen erzeugt und zum anderen eine freie Bewegung der Messantenne ermöglicht. Mit diesem Lösungsansatz kann selbst ein Tracking um große Objekte (z. B. Gitterbox) im Messvolumen erfolgen, wenn dieses dementsprechend konfiguriert bzw. aufgebaut wird.

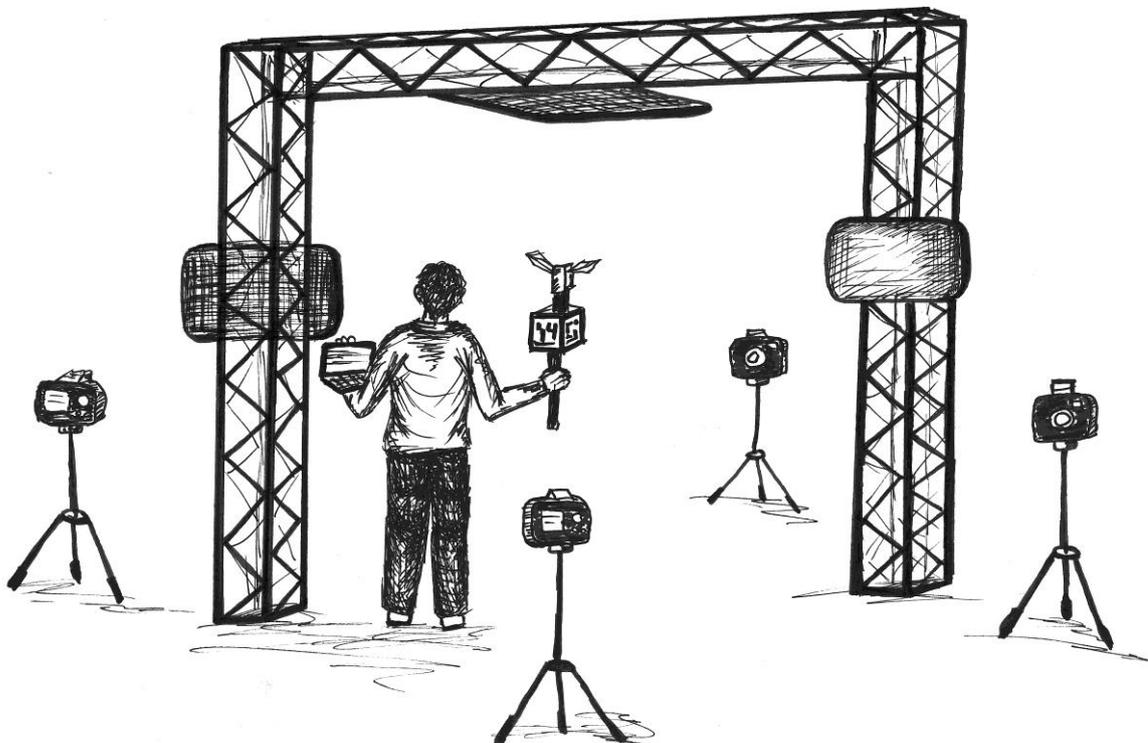


Abbildung 4-20: Grundaufbau des Lösungsansatzes des Low-Cost-Trackingsystems

Beschreibung des Lösungskonzepts zum Low-Cost-Tracking

Die benötigten KOS-Transformationen zum Aufbau und zur Messung mit der Low-Cost-Trackinglösung sind in Abbildung 4-21 angegeben. Eine Transformation wird in der Form ${}^A T_B$ angegeben. Dahinter verbirgt sich eine 4x4-Matrix, die aus einer Rotation ${}^A R_B$ und einer Translation ${}^A t_B$ zusammengesetzt ist (siehe Formel (4-1)). Die Indizes A und B geben dabei an, dass es sich um eine Transformation vom KOS B ins KOS A handelt. Die Pose eines Objektes O kann ebenso als Transformation ${}^A T_O$ betrachtet werden, durch die das körperfeste KOS O des Objektes in das gewünschte KOS A transformiert wird. Die Transformationen des Low-Cost-Trackingkonzepts werden im Folgenden anhand der mit dem System getätigten Schritte erklärt, die sich aus dem Gesamtverfahren zur Analyse und Optimierung von UHF-RFID-Installationen ableiten (siehe Abschnitt 4.2) lassen.

$${}^A T_B = \begin{pmatrix} {}^A R_B^{3 \times 3} & {}^A t_B^{3 \times 1} \\ [0 \ 0 \ 0] & 1 \end{pmatrix} \quad (4-1)$$

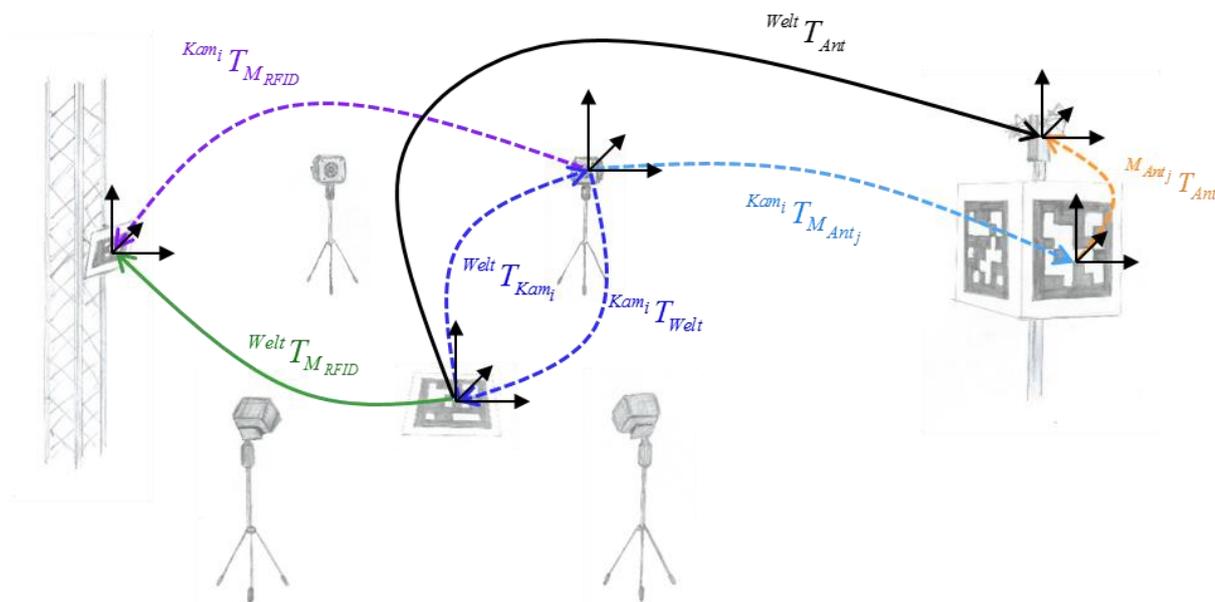


Abbildung 4-21: Transformationen zum Low-Cost-Trackingkonzept

Der erste notwendige Schritt zur Erfassung von Posen gemäß dem Low-Cost-Lösungskonzept ist die Raumkalibrierung. Die Kalibrierung dient dabei nicht nur der Festlegung eines Bezugs-KOS bzw. Welt-KOS, sondern ist ebenso nötig, um überhaupt ein Tracking mit mehreren Kameras zu ermöglichen. Jede einzelne Kamera liefert Posen ${}^{Kam_i} T_M$ zu den von ihr detektierten und ausgewerteten Markern M in ihrem eigenen Koordinatensystem Kam_i . Bei der Kalibrierung wird ein gemeinsamer

Bezug zwischen den Kameras geschaffen, damit die von den einzelnen Kameras gemessenen bzw. geschätzten Posen zusammen genutzt und verglichen werden können. Dazu bestimmen alle Kameras bei der Kalibrierung gleichzeitig die Pose zum selben (*Welt*)-Marker und somit die Transformation ${}^{Kam_i}T_{Welt}$ des KOS des Weltmarkers *Welt* ins jeweilige Kamera-KOS Kam_i . Durch die Invertierung der ermittelten Transformationen gemäß Formel (4-2) können die von den einzelnen Kameras *i* geschätzten Markerposen ${}^{Kam_i}T_{M_x}$ mit Formel (4-3) dann im gemeinsamen Welt-KOS angegeben werden.

$$\begin{aligned} {}^{Welt}T_{Kam_i} &= ({}^{Kam_i}T_{Welt})^{-1} \\ &= \begin{pmatrix} ({}^{Kam_i}R_{Welt})^T & -({}^{Kam_i}R_{Welt})^T * {}^{Kam_i}t_{Welt} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4-2) \end{aligned}$$

$${}^{Welt}T_{M_x} = {}^{Welt}T_{Kam_i} * {}^{Kam_i}T_{M_x} \quad (4-3)$$

Für stabile und möglichst korrekte Posenschätzungen bzw. Transformationen ${}^{Kam_i}T_{Welt}$ werden diese bei der Kalibrierung vielfach über einen längeren Zeitraum bestimmt und gemittelt. Durch die Bildung eines Mittelwertes über die zu unterschiedlichen Zeitpunkten ermittelten Posen werden die durch Sensorrauschen verursachten Schwankungen in der Bestimmung der Pose ausgeglichen und die Auswirkung schlechter Schätzwerte auf die Bestimmung von Posen im Welt-KOS abgemildert.

Ist der Vorgang der Raumkalibrierung abgeschlossen, ist das System dazu befähigt, Posen zu sämtlichen Markern in Bezug auf das festgelegte Welt-KOS zu erfassen. Dazu müssen die Marker jeweils nur von einer der Kameras erfasst werden. Das Messvolumen definiert sich also als der gemeinsame Sichtbereich aller Kameras, in dem die Marker vom Algorithmus zur Bildauswertung gefunden werden können.

Der nächste Schritt im Vorgehen ist die Erfassung der Posen zur RFID-Installation. Die entscheidenden zu erfassenden Informationen zur Konfiguration der Installation sind die Anzahl und die Posen der UHF-RFID-Antennen. Somit ist im System die Ausrichtung der einzelnen Antennen am Identifikationsaufbau bekannt. Im Funktionsdemonstrator zum System *MobiVis* werden dazu Marker M_{RFID} definiert. Durch Erfassung dieser RFID-Antennenmarker (siehe Abbildung 4-21) werden die Posen der Antennen analog zu Formel (4-3) mit Formel (4-4) berechnet. Auch hier wird analog zur Kalibrierung mit den Mittelwerten aus mehreren Posenschätzungen gearbeitet, da diese Messung keinen starken zeitlichen Restriktionen unterliegt und dadurch bessere Werte zu erwarten sind.

$${}^{Welt}T_{MRIFID} = {}^{Welt}T_{Kam_i} * {}^{Kam_i}T_{MRIFID} \quad (4-4)$$

Nachdem durch die Kalibrierung das System in Betriebsbereitschaft versetzt ist und die benötigten Daten zur Konfiguration der Installation gesammelt sind, ist der letzte Schritt die Erfassung bzw. Schätzung der Posen zur Messantenne während der Messung. Damit die Pose der Messantenne aus den unterschiedlichen Blickwinkeln der Kameras und bei unterschiedlicher Ausrichtung der Antenne erfasst werden kann, werden mehrere Marker auf einem Kubus angebracht. Dieser wird dann in festem Bezug auf der Antenne angebracht. Damit ist ein Tracking der Antenne möglich sobald mindestens ein Marker am Kubus von einer der Kameras erfasst wird. Damit aus den Posen zu den Antennenmarkern M_{Ant_j} auf die Position und Orientierung der Antenne geschlossen werden kann, ist für jeden Marker j eine zugehörige Transformation ${}^{M_{Ant_j}}T_{Ant}$ im System hinterlegt. Die Berechnung der Pose der Messantenne im Welt-KOS ${}^{Welt}T_{Ant}$ kann dann nach Formel (4-5) erfolgen. Das KOS der Antenne wird in die Mitte der reusenförmigen Spitze der Antenne gelegt.

$${}^{Welt}T_{Ant} = {}^{Welt}T_{Kam_i} * {}^{Kam_i}T_{M_{Ant_j}} * {}^{M_{Ant_j}}T_{Ant} \quad (4-5)$$

Die besondere Herausforderung bei diesem Aufbau ist es, stabile Trackingwerte zu liefern, wenn bei der Bestimmung der Antennenpose zwischen zwei Markern am Würfel gewechselt wird. Ein Grund dafür sind die Ungenauigkeiten bei der Anbringung der Marker am Würfel gemäß der im System hinterlegten Transformation. Ein weiterer Grund ist die erhöhte Fehleranfälligkeit der Posenschätzung im Falle einer starken Neigung der Markerebene gegenüber der Bildebene der Kamera, denn dies ist im Falle des Wechsels zwischen zwei Markern meist gegeben. Um den Effekt der dadurch zu erwartenden starken Schwankungen in den Posenwerten zur Antenne zu mindern, werden Mittelwerte zu den Posen aller aktuell sichtbaren, am Kubus befindlichen Marker gebildet. Zudem erfolgt eine Glättung der Posenschätzung anhand vorheriger Werte zur Antennenpose.

Realisierung der Software zum Low-Cost-Tracking zur Integration in das Gesamtsoftwaresystem

Zum Tracking mittels mehrerer Kameras sind keine Standardlösungen verfügbar, auf die zurückgegriffen werden kann. Die verschiedenen freien Toolkits, SDK bzw. SW-Bibliotheken liefern die Werkzeuge zum Tracking mit einer Kamera, aber es sind vorab keine Funktionen zum Tracking mittels mehrerer Kameras vorhanden. Eine weitere Beschränkung liegt in der Vorverarbeitung der von den Kameras gelieferten Bilder. In gängigen Toolkits beschränken sich die Vorverarbeitungsschritte auf eine Korrektur von Abbildungsfehlern im optischen System mittels einer Kamerakalibrie-

nung und eine geeignete Schwellwertbildung zur Umwandlung des Kamerabildes in ein schwarz-weißes Bild für die Markerdetektion. Diese Umstände erklären den Aufbau des Softwaremoduls zum Low-Cost-Tracking, wie er in Abbildung 4-22 gezeigt ist.

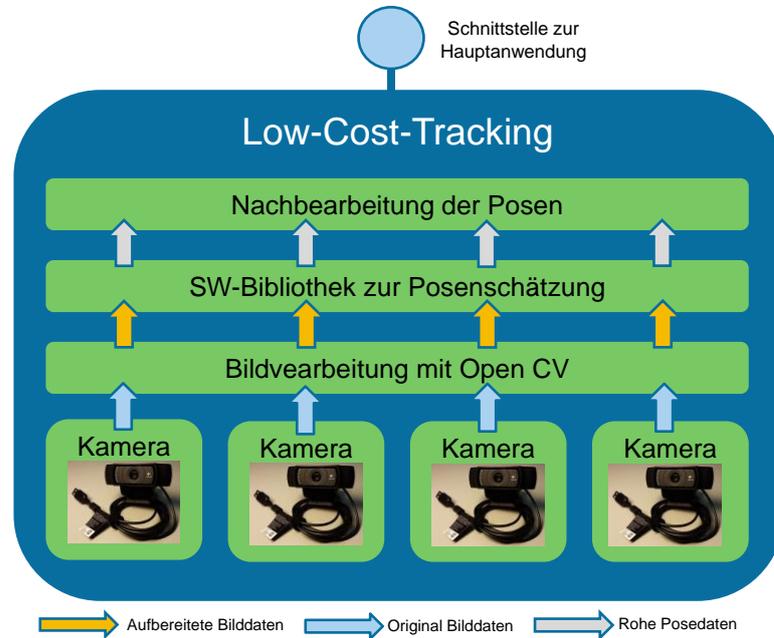


Abbildung 4-22: Aufbau des Softwaremoduls zum Low-Cost-Tracking

Das Multikameratracking im System MobiVis nutzt bis zu vier HD USB-Webcams und wird in der Software über ein Multi-Threading realisiert. Die Threads sind dabei für die einzelnen Kameras zuständig. Innerhalb der Threads werden mittels Open CV, einer SW-Bibliothek zur Bildverarbeitung, die Bilder von den Kameras ausgelesen und vorverarbeitet, bevor sie an die Komponente zur Posenschätzung weitergegeben werden. Durch die Nutzung von Open CV wird zum einen die Anbindung mehrerer Kameras über die Funktionen zum Auslesen der Bilder ermöglicht und zum anderen kann durch die Vorverarbeitungen der Bilder das Finden der Marker erleichtert und die Schätzung der Pose durch ein entsprechendes Toolkit gesteigert werden.

Ein grundsätzliches Problem der verfügbaren Softwarebibliotheken ist die Robustheit beim Finden mehrerer Marker im selben Bild einer heterogen ausgeleuchteten Szene, wie dies im Versuchsumfeld häufig der Fall ist. Für Augmented Reality Anwendungen im Consumerbereich ist dies normalerweise nicht so wichtig, da eine homogene Beleuchtung der Szene dort relativ einfach sichergestellt werden kann und für das Benutzerempfinden sogar muss. Ist die Szene aber unterschiedlich stark ausgeleuchtet, erscheinen manche Bereiche im Bild dunkler, andere heller. Enthalten sowohl eine dunkle als auch eine hellere Region im Bild jeweils einen Marker,

finden die Bibliotheken mittels eines über das ganze Bild konstanten Schwellwertes bei der Umwandlung in ein schwarz-weißes Bild zur Markerdetektion meist nur einen der beiden Marker selbst dann, wenn der Schwellwert adaptiv bestimmt wird. Dieser Problematik wird im Rahmen der Bildvorverarbeitung begegnet, indem eine Verstärkung der lokalen Kontraste durch einen Histogrammausgleich vorgenommen wird.

Die verwendeten Kameras (Webcams) zeichnen sich vor allem durch ihren niedrigen Preis aus. Die Bildqualität dieser Kameras ist im Vergleich zu erheblich teureren Industriekameras schlechter aber dennoch akzeptabel. Mittels einer Unschärfemaske wird das Bild moderat nachgeschärft, um die Kanten der Marker im Bild besser her austreten zu lassen und somit den Marker leichter im Bild auffindbar zu machen.

Eine Steigerung der Geschwindigkeit kann durch effiziente Entzerrung der Bilder im Rahmen der Kalibrierung erzielt werden. Auf Kosten von zusätzlichem Speicherplatz werden die Abbildungen, die zur Entzerrung notwendig sind, nicht immer wieder dynamisch berechnet, sondern in einer Lookup-Table gespeichert. Im konkreten Fall muss die Kalibrierung im Rahmen der Vorverarbeitung durchgeführt werden, da das verwendete SDK die Bilder nicht selbst entzerrt, wenn die Bilder nicht durch das SDK selbst von der Kamera abgegriffen werden.

Der softwaretechnische Aufbau der Softwaremodule erlaubt darüber hinaus einen einfachen Austausch der SW-Bibliothek zur Posenschätzung. Im Funktionsdemonstrator kommt das frei erhältliche Software Development Kit (SDK) von Metaio zum Einsatz, da dieses sich in verschiedenen Projekten als ein aufwandsarm zu nutzendes SDK erwiesen hat und stabile Tracking-Performance liefert. Nachdem die Posen aus den einzelnen Bildern ermittelt sind, werden sie in einen Puffer zur Nachbearbeitung abgelegt. Damit aus den rohen Posen durch weitere Aufbereitung verbesserte Posendaten abgerufen werden können, werden folgende Funktionen umgesetzt:

- Die Posen werden von jeder der Kameras aufgrund von Schwankungen in der Verarbeitungszeit zu geringfügig unterschiedlichen Zeiten bestimmt. Da die Messantenne in dieser Zeit bereits bewegt worden sein kann ist es notwendig, die Messwerte zu synchronisieren, um eine gemeinsame Verarbeitung der Messwerte unterschiedlicher Kameras zu ermöglichen. Dies wird erreicht, indem für alle Kameras die Posen zu einem synchronen, fiktiven Zeitpunkt aus den realen Messwerten interpoliert werden.
- Zur Reduktion der Auswirkungen des Sensorrauschens werden die Rohdaten mittels eines exponentiellen Filters geglättet.

- Im Regelfall ist im Sichtfeld aller Kameras mehr als ein Marker am Kubus zu sehen. Die Pose der Antennenspitze ist daher überbestimmt. Zur Reduktion von dadurch bedingten Schwankungen in den Posenwerten wird die absolute Position der Antenne durch Zusammenfassung zu einem mittleren Posenwert ermittelt. Dadurch wird zum einen die Wirkung vereinzelter Messfehler (schlechte Posenschätzung) abgemildert, zum anderen werden zu starke Schwankungen bei Veränderungen im Sichtfeld einzelner Kameras reduziert.
- Um die Schwankungen noch weiter zu reduzieren wird der mittlere Posenwert über die Zeit ebenfalls mit einem exponentiellen Filter geglättet.
- Offensichtlich fehlerbehaftete Posen (zu starke Schwankung zwischen zwei zeitlich aufeinanderfolgenden Werten) werden mittels eines Gradientenfilters erkannt und verworfen.

4.3.2 Entwicklung des Hochfrequenz Messkonzepts

Beim Test der Referenzsysteme zeigt sich unter anderem, dass es für die Messung der Feldstärkeausbreitung nicht möglich ist, das Messsignal vom UHF-RFID-Reader selbst zu erzeugen. Dies liegt an der schwankenden Signalstärke, die sich anhand der Sende- und Empfangsphasen der Geräte erklären lässt. Für einen Rückschluss auf die Aktivierung der passiven Transponder durch die vorherrschende Signalstärke ist ausschließlich die maximale Signalstärke beim Sendevorgang des Readers von Interesse. Während der Messung müsste also ein Signal mit dieser Sendeleistung konstant ausgegeben werden. Selbst wenn der ein oder andere Reader die Möglichkeit bietet, ein stetiges Signal zu erzeugen, soll der im Forschungsprojekt gewählte Lösungsansatz nicht auf die Verwendung derartiger Reader beschränkt sein. Deshalb enthält das Hochfrequenz-Messkonzept einen eigenen Ansatz zur Signalerzeugung. Ein weiterer Vorteil, der sich dadurch ergibt, ist eine Zuordnung der Messwerte zu den Sendeantennen an der Installation. Abbildung 4-23 zeigt schematisch den gewählten Lösungsansatz zum Konzept in Form von verknüpften Komponenten und Elementen.

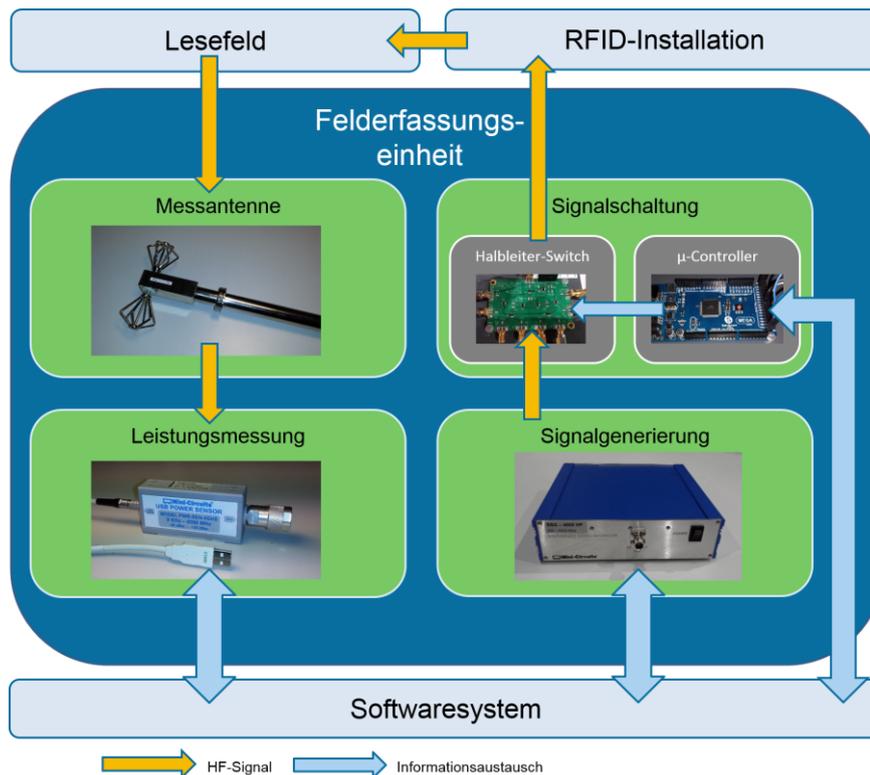


Abbildung 4-23: Konzept zur Erzeugung und Messung eines elektromagnetischen Feldes an einer UHF-RFID-Installation zur Analyse deren Konfiguration

Zur Erzeugung des zu messenden Signals wird im Projekt ein Signalgenerator eingesetzt. Der Signalgenerator wird vom Softwaresystem angesteuert und gibt dementsprechend ein Sinussignal in angegebener Stärke bei gewünschter Frequenz aus. Um das Signal analog zu einem RFID Schreib-/Lesegerät nacheinander auf die Sendantennen der Installation zu geben kann ein Hochfrequenzschalter eingesetzt werden. Dieser wird von einem Mikrocontroller gesteuert, der wiederum mit der Software des gesamten Messsystems kommuniziert.

Das ausgegebene Lesefeld wird dann von der Messantenne aus dem Raum aufgenommen. Die aufgenommene Leistung wird von einem Power-Sensor gemessen, der vom Softwaresystem ausgelesen wird.

Konzept zur Messsignalerzeugung an UHF-RFID-Installationen

Durch die Anbindung des Signalgenerators in der Software zum System MobiVis wird zur Messung ein Signal mit einer Leistungsstärke von bis zu 20 dBm ausgegeben. Eine Analyse des Feldes bei unterschiedlichen Sendeleistungen bis hin zur maximal erlaubten Sendeleistung im UHF-Frequenzband (33 dBm) kann mit Kenntnis der Signalverluste und -verstärkungen rechnerisch erfolgen (siehe Abschnitt 5.3). Im Funktionsdemonstrator zum Forschungsprojekt wird ein Signalgenerator der Firma Mini-Circuits (vgl. [Min-2013]) eingesetzt, der auf eine softwaretechnische Steuerung

ausgelegt ist. Aus diesem Grund sind am Gerät keine hardwaretechnischen Steuerelemente vorhanden. Dies steigert die Robustheit des Gerätes, das sich daher für einen Einsatz in industrieller Umgebung eignet. Die kleinen Abmessungen des Gerätes (212,6 x 215,9 x 54,6 mm) sprechen zudem für den mobilen Einsatz im Sinne des Forschungsvorhabens. All diese Eigenschaften zeichnen den Signalgenerator für den Einsatz im Low-Cost-System aus. Die Ansteuerung erfolgt hierbei über eine USB-Schnittstelle und kann in einer eigenen Anwendung über die mitgelieferte Schnittstelle zur Anwendungsprogrammierung (API) einfach realisiert werden.

Um aus dem Signal des Generators an der Installation ein elektromagnetisches Feld analog zu einem UHF-Reader zu erzeugen, wird es von einem Schalter (auch Switch oder Multiplexer genannt), der auf Basis von Halbleitertechnologie funktioniert, auf die Antennen der Installation geschaltet. Der Vorteil von Halbleiter-Switches gegenüber elektromechanischen Schaltern ist die oftmals um den Faktor 1000 geringere Schaltzeit, die somit eine hohe Wiederholrate der gesamten Feldstärkemessung ermöglicht. Die Schaltzeit von Halbleiterschaltern liegt meist im zweistelligen Mikrosekunden-Bereich und stellt dadurch keine Beschränkung für die Wiederholrate dar. Der im Funktionsdemonstrator eingesetzte Multiplexer der Firma SkyeTec stellt ein Erweiterungselement für ein UHF-RFID-Readermodul, also ein loses Schreib-/Lesegerät zur Integration in eigene Hardwarekomponenten, dar. Laut Angaben des Herstellers liegt die reine Schaltzeit hier sogar im Bereich von wenigen hundert Nanosekunden [Sky-2008].

Der Multiplexer kann einen Signaleingang auf acht verschiedene Signalausgänge schalten. Dadurch ist es möglich, eine Installation mit bis zu acht Sendeantennen zu untersuchen. Der Switch kann dazu über seine drei Steuer-Pins geschaltet werden. Dazu wird an den Pins eine Steuerspannung angelegt oder zu Null gesetzt. Über die Kombination der Spannungszustände an den drei Pins ergibt sich so die Schaltung der acht Ausgänge. Im Forschungsprojekt wird eine Physical-Computing-Plattform in Form eines Arduino zur Ansteuerung des Multiplexers verwendet. Die Plattform besteht aus einem Mikrocontroller mit angebotenen digitalen sowie analogen Ein- und Ausgängen inklusive einer seriellen Schnittstelle, um Daten mit anderen Geräten austauschen zu können. Diese serielle Schnittstelle wird im Funktionsdemonstrator zur Kommunikation zwischen der Softwareanwendung und dem Mikrocontroller eingesetzt. Darüber kann der Befehl zur Schaltung eines bestimmten Ausganges am Multiplexer an den Arduino weitergegeben werden, welcher dann über die Änderung der Zustände seiner digitalen Ausgänge den gewünschten Schaltzustand am Halbleiter-Switch herstellt. Dadurch kann nicht nur die Schaltung der hochfrequenten Signale auf die unterschiedlichen Antennen von der Software aus gesteuert werden, sondern zusätzlich eine Zuordnung der gemessenen Feldstärke zur Sendeantenne

erfolgen. Das gesamte Konzept zur Signalerzeugung ist in Abbildung 4-24 schematisch dargestellt.

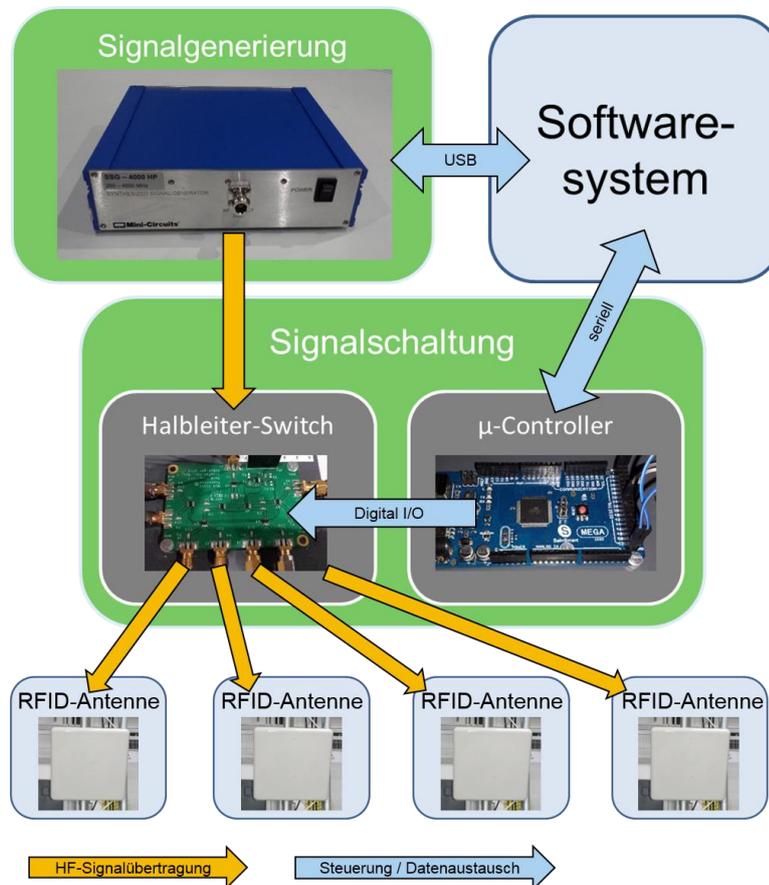


Abbildung 4-24: Konzept zur Signalerzeugung

Low-Cost-Konzept zur Messung der Stärke hochfrequenter Signale

Das Konzept zur Messung baut sich analog zum Referenzmesssystem auf. Es setzt sich im Wesentlichen ebenso aus einer Komponente zur Leistungsaufnahme und einer Komponente zur Leistungsmessung zusammen. Zur Leistungsaufnahme wird, wie beim Referenzsystem, eine bikonische Antenne eingesetzt. Die Messung der aufgenommenen Leistung übernimmt im Low-Cost-System ein Power-Sensor. Diese Geräte sind in Bezug auf die Anwendung zur mobilen Analyse von UHF-RFID-Lesefeldern gut geeignet, weil sie bei kleinen Abmessungen präzise Leistungsmessungen ermöglichen. Durch den geringeren Funktionsumfang eines USB Power-Sensors gegenüber einem Spektrumanalysator entsprechen diese Geräte dem Low-Cost-Ansatz, da sie dementsprechend preiswerter sind. Der große Nachteil am Einsatz von Power-Sensoren ist, dass es zunächst keine Möglichkeit, gibt die Messung auf eine Frequenz bzw. auf einen Frequenzbereich zu beschränken. Der im Funktionsdemonstrator verwendete USB Power-Sensor (vgl. [Min-2012]) kann Leistung im Frequenzbereich von 9 kHz bis 4000 MHz messen. Dieser Messbereich wird auf-

grund der Leistungsaufnahme durch die bikonische Antenne weiter beschränkt, da diese nur elektromagnetische Wellen im Bereich von 500 MHz bis 3 GHz aufnimmt. Die endgültige gemessene Leistung kann also aus Frequenzen aus dem gesamten Frequenzbereich der Leistungsaufnahme stammen. Bei diesem noch sehr großen Bereich gehen Signale wie z. B. aus Drahtlosnetzwerken bzw. -verbindungen aus dem 2,4 GHz ISM-Band, wie WLAN und Bluetooth, oder auch aus Verbindungen von Schnurlostelefonen auf Basis älterer sowie neuerer Standards mit in die Messung ein. Mit derartigen Funksignalen ist in der Einsatzumgebung der UHF-RFID-Installation bzw. des Lesefeldanalysesystems durchaus zu rechnen. Dies stellt somit ein Fehlerpotenzial für die Messung dar, da zur Bewertung der Energieversorgung der Transponder im Wesentlichen nur das Feld des RFID-Systems ausschlaggebend ist. Der Frequenzbereich, in dem UHF-RFID arbeitet, unterscheidet sich anhand der jeweiligen nationalen Vorschriften. Das Lösungskonzept im Forschungsvorhaben bezieht sich auf die in Europa geltenden Vorschriften des European Telecommunications Standards Institute (ETSI), welches die Nutzung des Bereichs von 865 MHz bis 868 MHz für UHF-RFID vorsieht. Die Konzepte lassen sich allerdings auch auf andere geltende Vorschriften anwenden. Um also trotzdem mit einem günstigen Leistungsmesser zur Aufnahme des Feldes arbeiten zu können, kommt im Low-Cost-Konzept ein Bandpassfilter (BPF) zum Einsatz. Die zur Messung der Feldstärke kombinierten Komponenten sind in Abbildung 4-25 dargestellt.



Abbildung 4-25: Komponenten der Feldstärkemessung

Ein BPF schwächt alle Signale mit Frequenzen unterhalb und oberhalb eines Frequenzbandes stark ab, sodass diese den Filter nicht bzw. nur sehr schwer passieren. Wird der Filter zwischen die Messantenne und den Leistungsmesser geschaltet, werden nur die Signale aus dem Durchlassbereich gemessen. Für den Funktionsdemonstrator wird ein von der Firma Rittmann speziell angepasster BPF eingesetzt. Für die Anpassung des Filters müssen die nächstgelegenen Funksignale betrachtet werden. Dies sind vor allem die Signale aus dem Long Term Evolution (LTE) und dem Global System for Mobile Communications (GSM) Mobilfunkstandard. Die für die Anpassung des BPF ausschlaggebenden Frequenzen sind in Tabelle 4-3 gelistet.

Tabelle 4-3: Funkstandards mit Frequenzen nahe dem ETSI UHF-Frequenzband [Sie-2000, Bun-2006, Bun-2014]

Funkstandard	Frequenzbereich	max. Sendeleistung P_{EIRP} (am Endgerät)
LTE	832–862 MHz	200 mW
GSM	890–915 MHz	2000 mW

Aus diesen Leistungsangaben lässt sich die zusätzlich empfangene Feldstärke E im Abstand r vom Sender anhand Formel (4-6) berechnen. P_{EIRP} ist die äquivalente isotrope Strahlungsleistung und Z_F der Feldwellenwiderstand, der im Vakuum so wie auch annähernd in Luft 377Ω beträgt.

$$E = \sqrt{\frac{P_{EIRP} * Z_F}{4\pi r^2}} \tag{4-6}$$

Entsprechend dieser Formel ergibt sich im Abstand von einem Meter für den LTE-Standard bei einem Sendepic des Mobilfunkgerätes eine Feldstärke von 2,45 V/m. Beim GSM-Standard ergibt sich analog eine Feldstärke von 7,74 V/m. Durch die Verwendung des BPF mit einer Kennlinie gemäß Abbildung 4-26 ergibt sich eine deutliche Abschwächung der Signale.

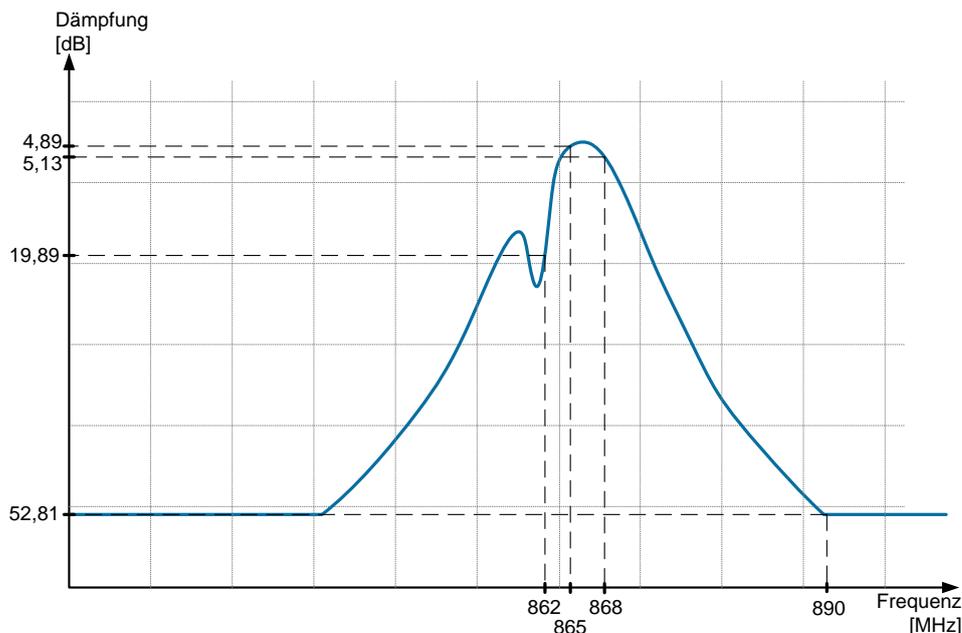


Abbildung 4-26: Kennlinie des im Low-Cost-Konzept verwendeten BPF [Rit-2014b]

In Tabelle 4-4 sind die theoretischen Feldstärkewerte E im Abstand von einem Meter mit und ohne Abschwächung durch den Bandpassfilter angegeben. Für die Berechnung der abgeschwächten Werte wird die Strahlungsleistung P_{EIRP} um die Dämpfung $D_{BPF}(f)$ verringert.

$$E_D = \sqrt{\frac{P_{EIRP} * D_{BPF}(f) * Z_F}{4\pi r^2}} \quad (4-7)$$

Die Dämpfungswerte $D_{BPF}(f)$ sind dabei abhängig von der Frequenz (siehe Abbildung 4-26). Die für die Berechnung des maximalen Einflusses der Signale aus dem Mobilfunk bei Verwendung des BPF betrachteten Dämpfungswerte sind somit die Grenzwerte $D(862MHz)$ und $D(890MHz)$ (siehe Tabelle 4-4). Beim Einsatz des BPF ist zu berücksichtigen, dass auch Signale aus dem UHF-Frequenzband leicht abgeschwächt werden. Dazu sind Vergleichswerte in Tabelle 4-4 angegeben.

Tabelle 4-4: Einfluss der Signale aus den nahen Frequenzbereichen mit und ohne Filterung im Abstand von einem Meter

Frequenz f	Strahlungsleistung P_{EIRP}	Dämpfung $D_{BPF}(f)$	Feldstärke E ohne Dämpfung	Feldstärke E_D mit Dämpfung
862	200 mW	19,89 dB	2,45 V/m	0,025 V/m
868	200 mW	5,13 dB	2,44 V/m	1,36 V/m
890	2000 mW	52,81 dB	7,74 V/m	0,018 V/m

Aus der Tabelle kann entnommen werden, dass die Signale der naheliegenden Mobilfunk-Frequenzbereiche um ein vielfaches stärker abgeschwächt werden. Somit kann der BPF die Leistungsmessung auf den von der ETSI definierten UHF-Frequenzbereich beschränken. Dazu muss bei der Berechnung der Feldstärkewerte jedoch die Dämpfung des Bandpassfilters mit einbezogen werden. Signale von anderen Vorrichtungen (z. B. Funk-Alarmanlagen), die denselben Frequenzbereich nutzen, können mit diesem Ansatz nicht gefiltert werden. Hier kann eine Messung bei abgeschalteter Signalerzeugung durchgeführt werden, um mögliche Störsignale zu identifizieren.

Zur Berechnung der Feldstärke E aus der gemessenen Leistung P_m wird Formel (4-11) verwendet. Sie wird gebildet, indem Formel (4-8) zur Berechnung der Strahlungsdichte S aus der empfangenen Leistung P_e , dem Antennengewinn G und der

Wellenlänge λ in Formel (4-9) zur Berechnung der Feldstärke E aus der Strahlungsdichte S und dem Feldwellenwiderstand in Luft Z_F eingesetzt wird. Die zur Berechnung der Feldstärke benötigte empfangene Leistung P_e kann aus der gemessenen Leistung P_m über die Dämpfungen D zwischen Antenne und Messgerät errechnet werden (siehe Formel (4-10)).

$$S = \frac{P_e * 4 * \pi}{\lambda^2 * G} \quad (4-8)$$

$$E = \sqrt{S * Z_F} \quad (4-9)$$

$$D = \frac{P_e}{P_m} \quad (4-10)$$

$$E = \sqrt{\frac{P_m * D * Z_F * \pi}{G} * \frac{2}{\lambda}} \quad (4-11)$$

In der Hochfrequenztechnik ist es üblich, mit Pegeln L und der Hilfsmaßeinheit Dezibel (dB) zu rechnen. Daher sind auch die meisten Angaben zu Gewinn, Dämpfung und Leistung in der Hilfsmaßeinheit Dezibel, also in dB bzw. in dBm angegeben. Den grundlegenden Zusammenhang zeigt Formel (4-12). Ein in dBm gegebener Wert ist ein Leistungspegel, der sich auf $P_2 = 1$ mW bezieht. Für eine Berechnung der Feldstärke E aus Werten, die in dB bzw. dBm gegeben sind, kann Formel (4-13) verwendet werden, welche aus dem Zusammenhang (4-12) und Formel (4-11) gebildet wird.

$$L = 10 * \lg\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \quad (4-12)$$

$$E = 10^{\frac{P_m[dBm]+D[dB]-G[dB]}{20} - 1,5} * \sqrt{Z_F * \pi} * \frac{2}{\lambda} \quad (4-13)$$

Mit Formel (4-13) kann über den kleinsten erfassbaren Leistungswert des Power-Sensors P_{Min} (vgl. [Min-2012]) die untere Grenze der Feldstärkemessung E_{Min} an der UHF-RFID-Installation berechnet werden. Die zur Berechnung benötigte Dämpfung $D_{BPF}(868 \text{ MHz})$ kann aus der Kennlinie in Abbildung 4-26 entnommen werden. Der isotrope Gewinn der bikonischen Antenne G_{Bi} wird durch lineare Interpolation an-

hand der Werte im Datenblatt (vgl. [Sch-2007b]) angenähert. Die Wellenlänge λ wird über die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle, also der Lichtgeschwindigkeit c , und die Frequenz f berechnet.

$$\begin{aligned}
 E &= 10^{\frac{P_m[\text{dBm}] + D[\text{dB}] - G[\text{dB}]}{20} - 1,5} * \sqrt{Z_F * \pi} * \frac{2}{\lambda} \\
 &= (10^{\frac{-30 [\text{dBm}] + 5,13 [\text{dB}] - 0,17 [\text{dBi}]}{20} - 1,5}) \sqrt{[W]} \quad (4-14) \\
 &* \sqrt{(377 * \pi) [\Omega]} * \frac{2}{\lambda[m]} = 0,35 \frac{V}{m}
 \end{aligned}$$

Der Einsatz der bikonischen Antenne begründet sich in ihrer dipolartigen Richtcharakteristik bei gleichzeitig großem Frequenzbereich. Wird das Messsystem ohne BPF betrieben, können somit auch Signale aus anderen Frequenzbändern detektiert werden. Die Dipolcharakteristik (siehe Abbildung 4-27) ist aus zwei Gründen für die Untersuchung von UHF-RFID-Installationen geeignet. Einerseits weisen viele der in der Logistik verwendeten Transponder eine ähnliche Charakteristik auf. Dies erlaubt den Rückschluss von der Orientierung der Messantenne bei der Erfassung eines bestimmten Wertes auf die Orientierung, in der die Transponder diesen Wert empfangen. Andererseits kann durch die Messung in drei Raumachsen ein isotroper Feldstärkewert aufgrund der Dipolcharakteristik angenähert werden.

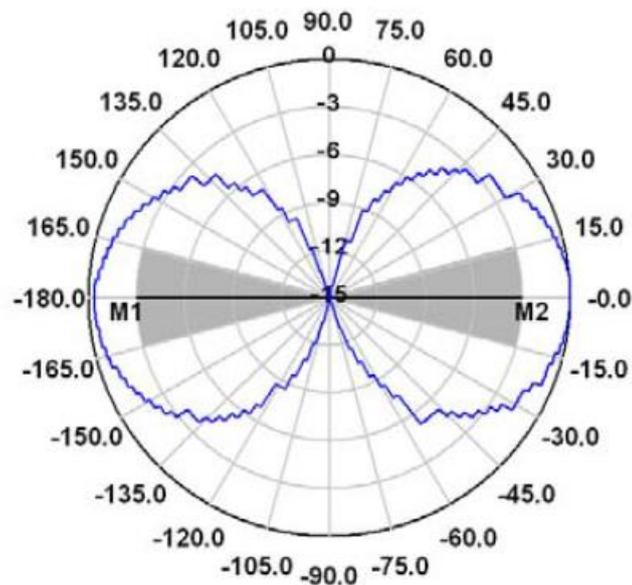


Abbildung 4-27: Richtdiagramm der bikonischen Antenne zur E-Ebene bei 1GHz

5 Entwicklung von Softwarekonzepten zur Messdatenerfassung, -aufbereitung und -visualisierung

In diesem Kapitel werden die Softwarekonzepte des Systems MobiVis behandelt und deren Entwicklung wird vorgestellt. Die Konzepte stellen die Basis für die Implementierungen des Funktionsdemonstrators dar. Aufbauend auf einer für den Demonstrator geeigneten Architektur und den zur Ansteuerung der Mess-Hardware entwickelten Schnittstellen werden die Konzepte zur Aufbereitung und Darstellung der Messdaten in 3D vorgestellt.

5.1 Softwarearchitektur zum System MobiVis

Bei der Entwicklung von Software kann auf den Einsatz von Mustern zurückgegriffen werden. Muster (engl. Patterns) sind bekannte Lösungsansätze für Probleme, die in ähnlicher Weise immer wiederkehren [Bus-1996]. Die Software zum System MobiVis greift unter anderem auf ein Architekturmuster und ein Entwurfsmuster zurück.

Nach *Buschmann et al.* helfen Architekturmuster dabei, die fundamentale Struktur einer Software festzulegen, indem Subsysteme bzw. Komponenten mit spezifischen Aufgaben definiert werden. Das verwendete Muster beeinflusst somit die grundlegenden Eigenschaften des Systems. Entwurfsmuster stellen Lösungsansätze für generelle Entwurfsprobleme auf Subsystemebene dar. Einige dieser Muster helfen dabei, Subsysteme weiter zu zerlegen, andere beschreiben Ansätze zur effektiven Kooperation zwischen Komponenten. [Bus-1996]

Nach Analyse der Anforderungen aus Abschnitt 3.2.3 lassen sich drei Hauptaufgabengebiete für die Software zum System MobiVis definieren:

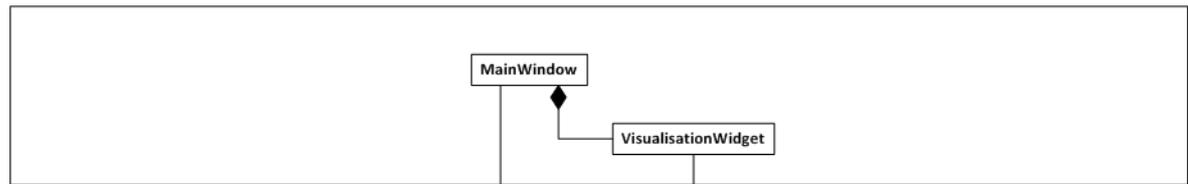
- Bereitstellung einer Schnittstelle zur Bedienung durch den Anwender und Darstellung bzw. Übermittlung von Messergebnissen
- Ansteuerung der Hardwarekomponenten und Ausführung von Steuerungsaufgaben zur Verarbeitung der Anfragen durch den Benutzer
- Speicherung bzw. Haltung der Messdaten und Aufbereitung dieser Daten zur Darstellung

Angesichts dieser Grobaufteilung der Aufgaben in Präsentation, Steuerung und Datenhaltung bietet sich der Aufbau der Software nach der 3-Schichten-Architektur an, deren Schichten eine Aufteilung entsprechend der oben genannten Aufgaben vorsehen [Bal-2005]. Die Vorteile dieser Architektur liegen darin, dass durch die Trennung in Schichten eine Unabhängigkeit zwischen den Systemteilen erzeugt wird. So können Teile leichter ausgetauscht oder weiterentwickelt werden, ohne größeren Änderungsbedarf in den anderen Schichten hervorzurufen [Bal-2005]. Dieser Aspekt wird im Projekt durch die strikte Umsetzung des Architekturmusters weiter gefördert. Bei einer strikten Schichtenarchitektur dürfen direkte Aufrufe nur von einer oberen Schicht in die direkt darunterliegende Schicht erfolgen. Zur Umsetzung dieser strikten Kommunikation zwischen den Schichten wird auf das Beobachter-Muster zurückgegriffen. Dabei handelt es sich um ein Entwurfsmuster aus der Softwareentwicklung zur indirekten Kommunikation zwischen Objektklassen [Gam-1995]. Das Beobachter-Muster unterscheidet zwischen beobachtenden und beobachteten Komponenten. Die beobachtenden Komponenten sind von den Änderungen in den beobachteten Komponenten abhängig. Statt eine direkte Beziehung zwischen den Komponenten und somit eine enge Bindung aufzubauen, sieht das Muster vor, dass beobachtete Komponenten bei Änderungen Signale aussenden. Die interessierten Beobachter können diese Signale empfangen und dann die neuen Daten abrufen. Datenabfragen bzw. Funktionsaufrufe sind deshalb nur in eine Richtung notwendig. Dadurch wird ermöglicht, dass Aufrufe nur von einer oberen Schicht in eine untere Schicht im System erfolgen. Ändern sich also Daten in der untersten Schicht, wird die Präsentationsschicht über die entsprechenden Signale darüber informiert. Die Präsentationsschicht kann dann über die Logikschicht die benötigten Daten anfragen.

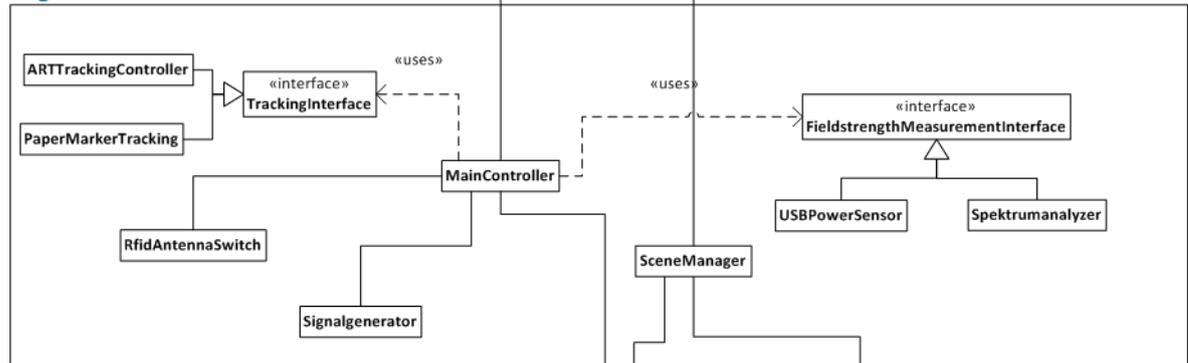
Die Anwendung der Architektur- und Entwurfsmuster soll die Wiederverwendbarkeit und die Erweiterbarkeit der Softwarelösung erleichtern. Einerseits ist dies für die Weiterentwicklung und Überarbeitung der Testsoftware aus Abschnitt 4.1.3 hin zur Software des Funktionsdemonstrators förderlich. Andererseits soll die Weiterentwicklung des Funktionsdemonstrators durch interessierte Unternehmen aus der Industrie erleichtert werden.

Der Aufbau der Software zum System MobiVis ist im Klassendiagramm in Abbildung 5-1 gezeigt. Das Diagramm gibt das Softwaresystem nicht eins zu eins wieder. Vielmehr wird eine geeignete Abstraktionsebene gewählt, um den Aufbau der Software wiedergeben zu können. Die Aufgaben und der Aufbau der einzelnen Schichten werden in den folgenden Unterabschnitten genauer beschrieben.

Präsentationsschicht



Logikschicht



Datenhaltungsschicht

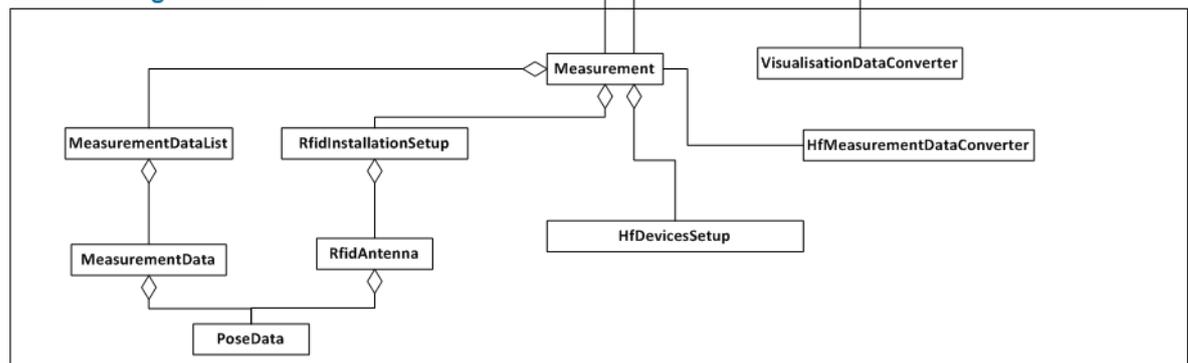


Abbildung 5-1: Architektur der Software zum System MobiVis

5.1.1 Datenhaltung im System MobiVis

In der Datenhaltungsschicht des Softwaresystems werden alle Daten zur Lesefeldanalyse hinterlegt. Sie speichert somit die Daten zur Konfiguration der Installation sowie die bei der Messung erfassten Daten. Die zentrale Klasse dieser Schicht ist die Klasse *Measurement*. Diese Klasse beinhaltet alle weiteren Klassen zur Datenhaltung. Zudem verfügt die Datenschicht über zwei weitere Hilfsklassen, die Funktionen zur Konvertierung der Daten in die benötigte Form anbieten. Die einzelnen Klassen und deren Beschreibungen sind in Tabelle 5-1 beschrieben.

Tabelle 5-1: Klassen der Datenhaltungsschicht

Klasse	Beschreibung
Measurement	Über die Measurement-Klasse findet der Zugriff und die Ablage aller in der Software gehaltenen Daten statt. Sie beinhaltet weitere Klassen, welche die Daten weiter kapseln und untergliedern.
MeasurementDataList	Bei dieser Klasse handelt es sich um eine Containerklasse, die Objekte der Klasse MeasurementData aufnimmt. Sie beinhaltet somit die gesamten Messdaten zu einer Messung.
MeasurementData	Die Klasse MeasurementData repräsentiert den Datensatz zu den Rohdaten eines Messpunkts. Sie beinhaltet also ein Objekt zur Klasse PoseData sowie den gemessenen Leistungswert und die Information, welche Antenne den Wert erzeugt.
HfDeviceSetup	Hierin werden die Informationen zu den verwendeten Geräten gespeichert. Auf den zugehörigen Kennwerten zu den HF-Geräten basieren weitere Umrechnungen der Rohdaten der Messung, wie sie beispielsweise die Klasse HFMeasurementDataConverter vornimmt.
RfidInstallationSetup	In dieser Klasse sind die Daten zur Konfiguration der RFID-Installation gesammelt.
RfidAntenna	In RfidAntenna sind alle Konfigurationsdaten zu einer UHF-RFID-Antenne der Installation gesammelt. Sie beinhaltet einen Teil der gesamten Konfigurationsdaten und ist somit in RfidInstallationSetup enthalten.
PoseData	Die Klasse PoseData kapselt einzelne Posen. Sowohl RFID-Antennen als auch Messdaten besitzen Posen. Deshalb wird diese Klasse auch in der Klasse RfidAntenna und MeasurementData verwendet.
RfidAntennaSwitch	HFMeasurementDataConverter bietet Funktionen und Konstanten zur Wandlung bzw. Umrechnung der gemessenen HF-Messdaten an.
VisualisationDataConverter	Falls Daten zur Visualisierung aufbereitet werden müssen, werden von dieser Klasse die benötigten Berechnungsfunktionen angeboten.

5.1.2 Logikschicht im System MobiVis

Die Logikschicht ist als Steuerzentrale des Softwaresystems zu betrachten. Die Kernkomponente dieser Schicht ist die Klasse *MainController*. Der *MainController* stellt zugleich den Kern der gesamten Software dar. Diese Klasse steuert die Hard-

warekomponenten zur Messung an, legt die von ihnen gelieferten Messdaten in der Datenschicht ab, bearbeitet Eingaben vom Benutzer aus der Präsentationsschicht und holt angeforderte Daten aus der Datenhaltungsschicht.

Zur Kommunikation zwischen dem *MainController* und den Systemen zur Messung von Posen und HF-Signalleistung werden Schnittstellen (engl. Interfaces) eingesetzt. Unter Schnittstellen werden in der Programmierung Konstrukte bezeichnet, die eine Art Vereinbarung zu gelieferten Funktionen darstellen. Soll eine Klasse über eine Schnittstelle angebunden werden, so muss sie über die in der Schnittstelle definierten Funktionen verfügen. Damit kann bei Verwendung von unterschiedlichen Klassen immer mit denselben Funktionsaufrufen gearbeitet werden. Dies gewährleistet einen einfachen Austausch von Komponenten. In der Software zum System MobiVis werden Schnittstellen dazu eingesetzt, eine einfache Anbindung bzw. einen einfachen Wechsel zwischen Referenz- sowie Low-Cost-Messsystemen zu realisieren. Die weiteren HW-Komponenten im System sind direkt an den *Maincontroller* angebunden, da hier jeweils nur eine Komponente zur Verfügung steht. Beschreibungen zu den Schnittstellen und Klassen zur Steuerung und Kommunikation mit der Hardware sind in Tabelle 5-2 aufgeführt.

Die Klasse *SceneManager* nimmt in der Logikschicht eine gesonderte Stellung ein und ist daher nicht in Tabelle 5-2 aufgeführt. Sie ist ein zentraler Bestandteil zur Realisierung der Visualisierung. Der *SceneManager* ist das Bindeglied zwischen der Visualisierung in der Präsentationsschicht und den darzustellenden Daten. Dazu bereitet er über Funktionen aus dem *VisualisationDataConverter* die Daten auf und gibt sie zur Darstellung an die Klasse zur Visualisierung weiter.

Tabelle 5-2: Schnittstellen und Klassen zur Hardwareanbindung

Klasse	Beschreibung
TrackingInterface	Diese Schnittstelle gibt folgende Funktionen vor: - Abfrage von Posen der RFID-Antennen - Abfrage der Pose der Messantenne - Abfrage der Pose zum Welt-KOS - Durchführung der Raumkalibrierung
ARTTrackingContoller	Diese Klasse realisiert die durch das TrackingInterface vorgegebenen Funktionen durch Nutzung der SW-Bibliothek zum Referenztrackingsystem von ART.
PaperMarkerTracking	Mit dieser Klasse werden die Zugriffe auf das Low-Cost-Trackingmodul zur Erbringung der Funktionen entsprechend der Trackingschnittstelle umgesetzt.
FieldMeasurementInterface	Diese Schnittstelle gibt die Funktion zur Messung der Leistung vor.
USBPowerSensor	Diese Klasse nutzt die SW-Bibliothek zur Initialisierung des Power-Sensors und zur Durchführung einer Messung.
SpectrumAnalyzer	Diese Klasse kommuniziert mit dem Spektrumanalysator und ruft die Messdaten vom Gerät ab.
RfidAntennaSwitch	Diese Klasse übernimmt die serielle Kommunikation mit dem Mikrocontroller zur Schaltung der RFID-Antennen.
Signalgenerator	Diese Klasse stellt sämtliche Funktionen zur Steuerung des Signalgenerators bereit.

5.1.3 Präsentationsschicht im System MobiVis

Die Präsentationsschicht wird oftmals auch als GUI-Schicht bezeichnet. Die Aufgabe dieser Schicht ist die Kommunikation mit dem Benutzer. Sie muss einerseits die Steuerungsbefehle des Benutzers aufnehmen und weitergeben. Andererseits müssen alle für den Anwender notwendigen Informationen durch die GUI übermittelt werden. Im SW-System von MobiVis wird die gesamte GUI über die Klasse MainWindow abgebildet. Auch die Klasse zur Ausgabe der Visualisierung (Visualisation-Widget) ist im Hauptfenster enthalten. Die Klasse zum Hauptfenster beinhaltet eine große Anzahl anderer Klassen, da es für die verschiedenen Steuerelemente (Widget) zur GUI jeweils eigene Klassen gibt. Die Klassen sind nicht einzeln im Klassendiagramm in Abbildung 5-1 aufgeführt, da sie alle unter der Klasse MainWindow zusammengefasst sind und sich somit ein übersichtlicheres Abbild zum Aufbau der

Software ergibt. Die Präsentationsschicht lässt sich am besten anhand des Aufbaus des Hauptfensters zur Anwendung in Abbildung 5-2 beschreiben.

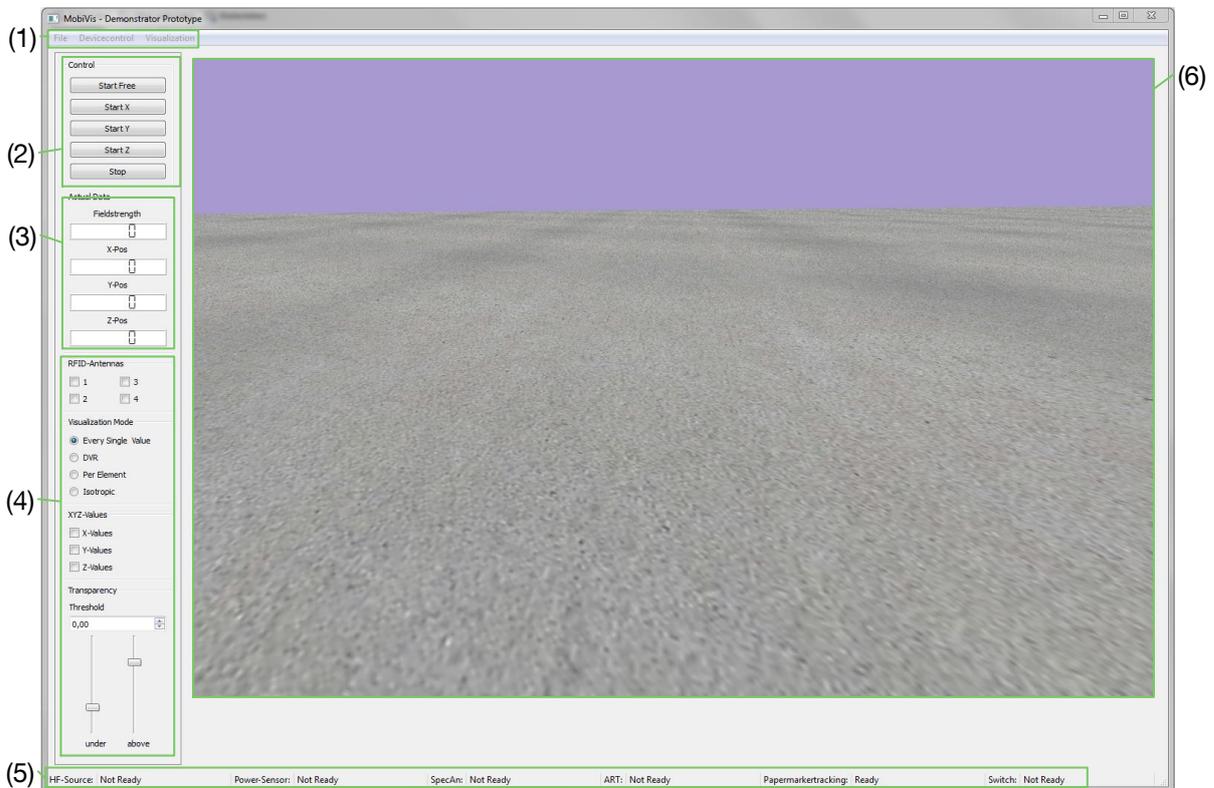


Abbildung 5-2: Aufbau des Hauptfensters der Softwareanwendung zum System MobiVis: (1) Menüleiste zur grundlegenden Steuerung der Anwendung, (2) Bereich zur Steuerung der Messung, (3) Anzeige für aktuelle Messwerte, (4) Elemente zur Einstellung der Visualisierung, (5) Statusleiste zur Anzeige verbundener HW-Komponenten, (6) Unterfenster zur Ausgabe der 3D-Visualisierung

Die grafische Benutzeroberfläche der Softwareanwendung wird in sechs Bereiche ((1)-(6)) untergliedert. Sie verfügt, wie bei vielen GUIs üblich, über eine Menüleiste (1) zur grundlegenden Steuerung der Anwendung. Unter anderem können über diese Menüs Messungen gespeichert und geladen sowie neue Messungen angelegt werden. Im Bereich zur Steuerung der Messung (2) befinden sich sämtliche Buttons zum Start und Stop verschiedener Arten von Messungen. Mit den Anzeigeelementen im Bereich (3) können die aktuellen Messwerte ausgegeben werden. Die Visualisierung kann mit Hilfe der Elemente im Bereich (4) eingestellt werden. Die Statusleiste des Hauptfensters (5) zeigt den Verbindungsstatus der HW-Komponenten an. Im integrierten Unterfenster (6) wird die dreidimensionale Visualisierung der Messergebnisse ausgegeben.

5.2 Implementierung der Software

Zur Umsetzung der Software wird die Programmiersprache C++ gewählt, weil alle verwendeten Hardwarekomponenten eine Programmierschnittstelle in dieser Sprache anbieten. Zudem lässt C++ aufgrund der möglichen Anwendung des objektorientierten Programmierparadigmas die Umsetzung des objektorientierten Designs der Software (siehe Abschnitt 5.1) zu. Die grafische Benutzeroberfläche wird unter Verwendung von Qt, einer dafür entwickelten C++-Klassenbibliothek, erstellt. Das von dieser Bibliothek bereitgestellte Signal-Slot-Konzept zur Kommunikation zwischen Objekten ermöglicht es weiterhin auf einfache Weise das Beobachter-Muster zu implementieren. Durch die Umsetzung des Beobachter-Musters können die Vorschriften zu den Funktionsaufrufen entsprechend einer strikten Schichtenarchitektur eingehalten werden. Die Visualisierung in 3D wird über die Open Graphics Library (OpenGL) umgesetzt. Für die Rückverfolgung und Verwaltung der Entwicklungsstände der Software zum Funktionsdemonstrator wird mit dem Versionsverwaltungstool Git gearbeitet.

Die Implementierung des Softwaresystems basiert auf dem SW-Prototypen zum Funktionsdemonstrator, mit dem die Referenzmesssysteme angebunden und gesteuert werden (siehe Abschnitt 4.1.3), wobei dessen Aufbau der in Abschnitt 5.1 vorgestellten Schichtenarchitektur entspricht. Die Vorteile dieser Architektur ermöglichen die einfache Weiterentwicklung der Schichten, ohne große Änderungsbedarfe an den anderen Schichten hervorzurufen. So konnten Teile aus dem SW-Prototypen zur Entwicklung der Softwareanwendung des Demonstrators einfach wiederverwendet sowie geändert werden.

5.3 Visualisierungskonzepte und Datenaufbereitung

Die Visualisierungskonzepte im System MobiVis unterstützen den Anwender nicht nur bei der Analyse der Messwerte durch die Darstellung des gemessenen Feldes, sondern dienen auch als Anzeigeelement während der Messung. Dementsprechend ist dieser Abschnitt in zwei Unterabschnitte aufgeteilt. Die Konzepte, mit denen der Messfortschritt und die Messergebnisse in Echtzeit visualisiert werden, und die dazugehörigen Maßnahmen zur Datenaufbereitung sind in Abschnitt 5.3.1 beschrieben. In Abschnitt 5.3.2 finden sich die Visualisierungskonzepte, die es ermöglichen nach Abschluss der Messung verschiedene Aspekte der Lesefeldausbreitung an der Installation zu analysieren.

5.3.1 Echtzeitvisualisierung zur Messung

Die Visualisierungen in Echtzeit sollen den Anwender zum einen bei der Erfassung der Messwerte unterstützen, zum andern sollen erste Messergebnisse sofort zur Verfügung stehen. Dies ermöglicht es auf schlechte Messwerte schnell zu reagieren. Mangelhafte Lesefeldausprägungen können daher direkt identifiziert werden ohne eine komplette Vermessung des Messvolumens vornehmen zu müssen. Beide Informationen gilt es in einer Visualisierung integriert darzustellen, sodass der Benutzer diese von zentraler Stelle aus aufnehmen kann. Die Konzepte zur Visualisierung der Daten in Echtzeit lassen sich am besten anhand von Screenshots (siehe Abbildung 5-3 und Abbildung 5-4) der Software des Funktionsdemonstrators beschreiben.

Abbildung 5-3 zeigt die Ausgangslage vor der Messung, welche dem Anwender nach der Definition des Messvolumens angezeigt wird. Dies geschieht, indem dieser zwei Punkte über die getrackte Messantenne ins System eingibt. Diese zwei Punkte definieren die Raumdiagonale eines Quaders, der sogleich das Messvolumen repräsentiert. Über dieses einfache und schnelle Vorgehen ist die flexible Wahl des Messvolumens im Funktionsdemonstrator realisiert. Zur Eingabe der Raumdiagonale wird zusätzlich die Auflösung der Messung vom Benutzer abgefragt. Durch die Eingabe der Auflösung wird der Quader zum gesamten Messvolumen in viele kleine Quaderelemente unterteilt. Das Resultat ist die Anzeige des noch nicht vermessenen Messvolumens entsprechend Abbildung 5-3. Die Darstellung des Modells zur Installation kann mit den Daten aus dem vorhergehenden Schritt zur Erfassung der RFID-Installation erfolgen (siehe Vorgehen Abschnitt 4.2). Die Eingabe der Daten zu den Posen der Installation wird dabei ebenfalls durch Nutzung des Trackingsystems realisiert. Weitere Objekte in der Umgebung, wie beispielsweise Gitterboxen, können über das gleiche Verfahren in die Visualisierung integriert werden.

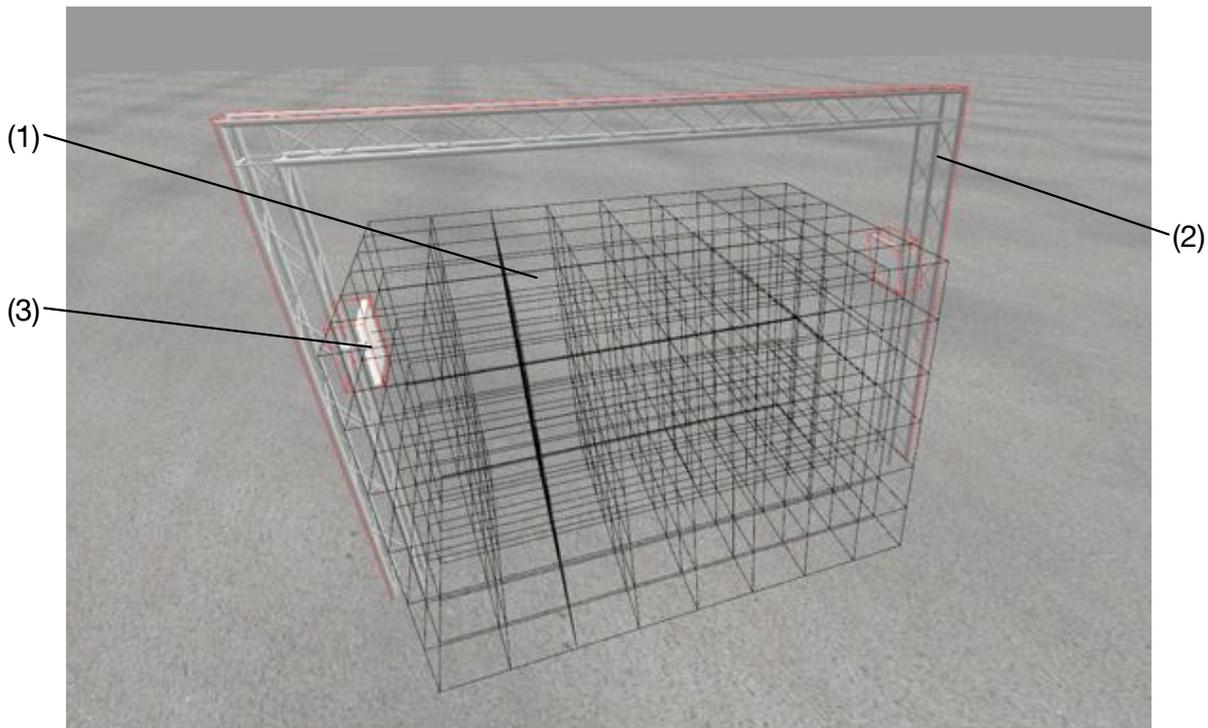


Abbildung 5-3: Visualisierung des Messvolumens an der Installation vor der Messung: (1) Darstellung des Messvolumens mit Quaderelementen, (2) Modell der Installation, (3) Visualisierung der UHF-RFID-Antennen

Zur Erfassung des Lesefeldes wird die Messantenne durch das vorgegebene Volumen an der Installation geführt. Dabei muss in jedem Unterelement eine bestimmte Anzahl von Messungen erfolgen. Die Anzahl der Messungen pro Volumenelement orientiert sich an den in der ISO-Norm 18046 [ISO 18046] angegebenen zehn Messungen pro Messpunkt. Bei der Vermessung von RFID-Installationen mit mehr als einer Antenne werden pro Antenne zehn Messungen aufgenommen. Diese Messungen schaffen die Grundlage für weitere Visualisierungs- bzw. Datenaufbereitungsmethoden der Messergebnisse (siehe Abschnitt 5.3.2). Während der Messung wird die aktuelle Pose der Messantenne in 3D visualisiert (siehe Abbildung 5-4, (4)). Darüber erhält der Nutzer eine Rückmeldung, in welchem Bereich bzw. Quaderelement er momentan Messungen durchführt. Die Anzahl der aufgenommenen Messungen im einzelnen Element wird in Analogie zu einem Fortschrittsbalken dargestellt (siehe Abbildung 5-4, (1) und (2)). Dazu wird das jeweilige Quaderelement mit einer Färbung gefüllt, welche proportional zur Anzahl der Messungen nach oben steigt und sich gleichzeitig von rot nach grün verfärbt. Abbildung 5-4 zeigt beispielsweise diverse Quaderelemente mit unterschiedlichen Messfortschritten an. Ist eine ausreichende Anzahl an Messungen im einzelnen Element erfolgt, so verschwindet der zugehörige schwarze Rahmen (siehe Abbildung 5-4, (3)). Die komplette Vermessung des Untersuchungsvolumens ist daran zu erkennen, dass kein Quaderelement mehr in der Visualisierung dargestellt wird. Diese Form der Fortschrittsanzeige bei der

Messung mit dem System lässt den Benutzer erkennen, welche Teile des zu untersuchenden Lesefeldes tatsächlich messtechnisch erfasst sind.

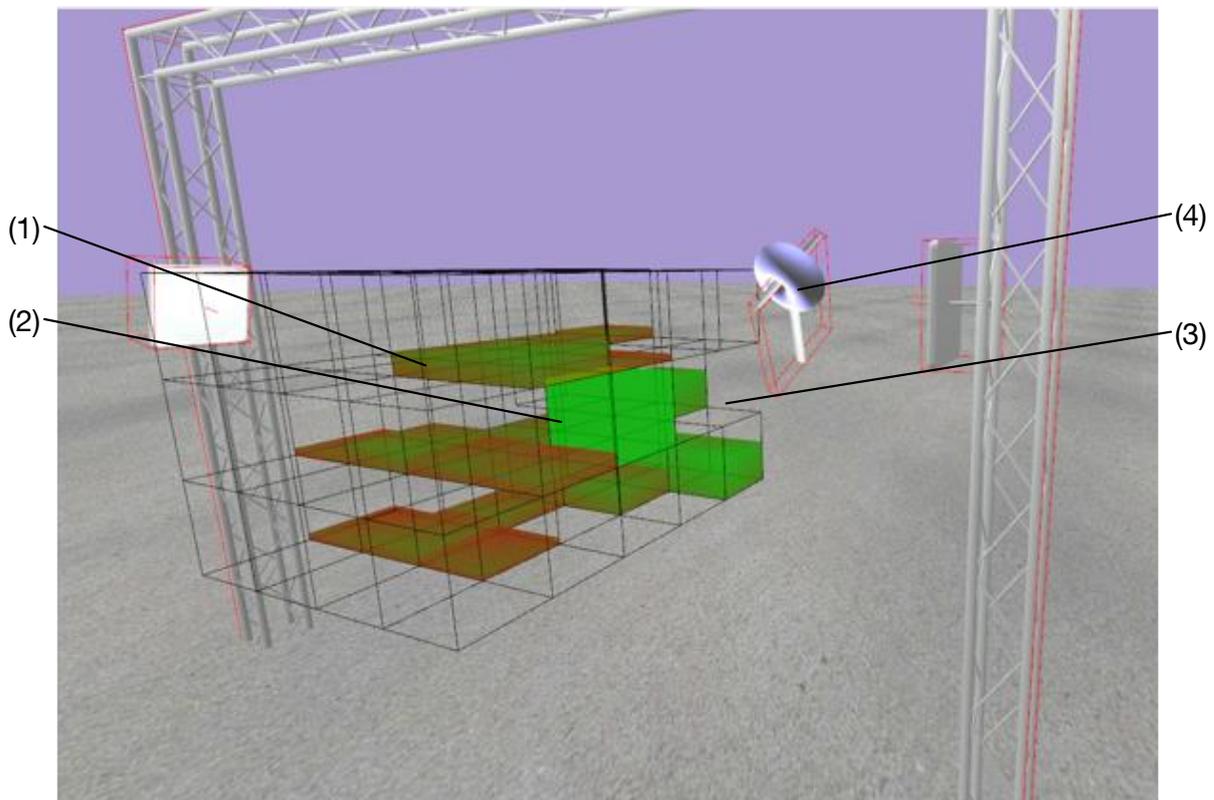


Abbildung 5-4: Visualisierung des Fortschritts der Messung: (1) Quaderelement mit geringer Anzahl an Messungen, (2) Quaderelement mit hoher Anzahl an Messungen, (3) Verschwundenes Quaderelement nach Erfassung einer ausreichenden Anzahl an Messwerten, (4) Darstellung der Messantenne an aktueller Pose

Die Anzeige der Messantenne zusammen mit dem Modell zur Empfangscharakteristik dient nicht nur zur Rückmeldung der Pose der Messung. Über die Verfärbung des Modells zur Antennencharakteristik wird bei der Messung ein qualitativer Wert zur gemessenen Feldstärke in Echtzeit angezeigt. Die Anzeige der Charakteristik der Antenne hilft außerdem dabei diese zur Aufnahme der Strahlung in geeigneter Weise zu orientieren. Die in Abbildung 5-4 gezeigte Charakteristik entspricht der eines Dipols so wie sie die im Funktionsdemonstrator verwendete bikonische Antenne aufweist, wobei auch viele der in der Logistik verwendeten Transponder analoge Empfangseigenschaften aufweisen. Das zugehörige mathematische Modell zur Charakteristik der Antenne ist ein Torus.

Damit eine Darstellung zum isotropen Feldstärkewert (siehe Abschnitt 5.3.2) ermöglicht wird, müssen Messungen durchgeführt werden, bei denen durch die Antenne jeweils Messwerte entlang der drei Hauptachsen erfasst werden. Zur Unterstützung derartiger Messungen und zur Sicherstellung einer ausreichenden Anzahl entspre-

chender Messungen in den einzelnen Quaderelementen können verschiedene Arten von Messungen gestartet werden. Bei diesen Messungen verhält sich die Fortschrittsanzeige analog. Der Unterschied liegt darin, dass der Fortschritt von der Ausrichtung der Messantenne abhängig ist. Dies kann durch die Auswertung der vom Trackingsystem gelieferten Orientierung der Antenne geschehen.

Die Anzeige der Farbwerte der Messantenne erfolgt analog zur Feldstärke $E(P_{EIRP_{conf}})$. Diese wird aus der Strahlungsleistung $P_{EIRP_{conf}}$ berechnet, welche die Installation entsprechend einer Konfiguration (*conf*) an der Antenne i abgeben würde. Deshalb müssen die gemessenen Leistungswerte P_m entsprechend aufbereitet werden. Dies geschieht mit Formel (5-1) unter Einbezug der Messdaten und den angegebenen leistungsbezogenen Konfigurationsdaten des RFID-Systems.

$$E(P_{EIRP_{conf_i}}) = 10^{\frac{P_m + \Delta P_{EIRP_{Reader/SG}} + D_m - G_m}{20} - 1,5} * \sqrt{Z_F * \pi} * \frac{2}{\lambda} \quad (5-1)$$

Ausschlaggebend ist dabei der Unterschied $\Delta P_{EIRP_{Reader/SG_i}}$ (siehe Formel (5-4)) zwischen der Strahlungsleistung $P_{EIRP_{Reader_i}}$, die durch einen Reader an der Antenne i abgegeben würde (siehe Formel (5-2)) und der durch den Signalgenerator an der RFID-Antenne i erzeugten Strahlungsleistung $P_{EIRP_{SG_i}}$ (siehe Formel (5-3)). Es ist anzumerken, dass es gängigen Readermodellen möglich ist, für jeden Ausgang i eine individuelle Ausgangsleistung einzustellen. Durch die Kommunikation des Softwaresystems mit dem Mikrocontroller werden die Ausgänge des Switch gesteuert. Darüber ist bekannt, welche Antenne den Feldstärkewert erzeugt hat. Dadurch ist eine differenzierte Betrachtung der Werte zu den einzelnen Antennen möglich.

$$P_{EIRP_{Reader_i}} = P_{Reader_i} - D_{cable_i} + G_{Ant_i} \quad (5-2)$$

$$P_{EIRP_{SG_i}} = P_{SG} - D_{Switch} - D_{cable_i} + G_{Ant_i} \quad (5-3)$$

$$\Delta P_{EIRP_{Reader/SG_i}} = P_{EIRP_{Reader_i}} - P_{EIRP_{SG_i}} \quad (5-4)$$

Die einbezogenen Konfigurationsdaten zur Installation lassen sich auf die Ausgangsleistung P_{Reader_i} an den Antennenanschlüssen i des Readers reduzieren. Dazu müssen zur Verbindung der Ausgänge am Switch zu den RFID-Antennen i dieselben Kabel wie bei der Verbindung der Readerausgänge mit den Antennen der Installation verwendet werden. Dann ergibt sich die Leistungsdifferenz gemäß Formel (5-5) aus der Ausgangsleistung am Signalgenerator P_{SG} und am Reader P_{Reader_i} sowie der Dämpfung im Switch D_{Switch} .

$$\Delta P_{EIRP_{Reader}/SG_i} = P_{Reader_i} - P_{SG} + D_{Switch} \quad (5-5)$$

Die einbezogenen Messdaten zum HF-Messsystem sind die Summe aller Dämpfungen D_m im Messaufbau und der Gewinn G_m der Messantenne. Im Low-Cost-Messsystem entspricht die Dämpfung D_m ausschließlich der Dämpfung D_{BPF} im Bandpassfilter. Beim Referenzmesssystem ist die Dämpfung D_m mit der Dämpfung im Kabel $D_{cable_{ant}}$ zwischen Messantenne und Spektrumanalysator gleichzusetzen.

Die oben vorgestellten Formeln zur Berechnung der Feldstärke stellen ebenso die Grundlage für die Visualisierungen in Abschnitt 5.3.2 dar.

5.3.2 Visualisierungsmethoden zur Lesefeldanalyse

Zur Untersuchung der verschiedenen Aspekte bei der Lesefeldanalyse stellt das Konzept mehrere Methoden zur Visualisierung bereit. Die verschiedenen Visualisierungsmethoden lassen sich über die GUI anwählen und wirken sich direkt auf die Visualisierung aus. Die Auswahlmöglichkeiten zur Änderung der dreidimensionalen Darstellung sind in Abbildung 5-5 gezeigt.

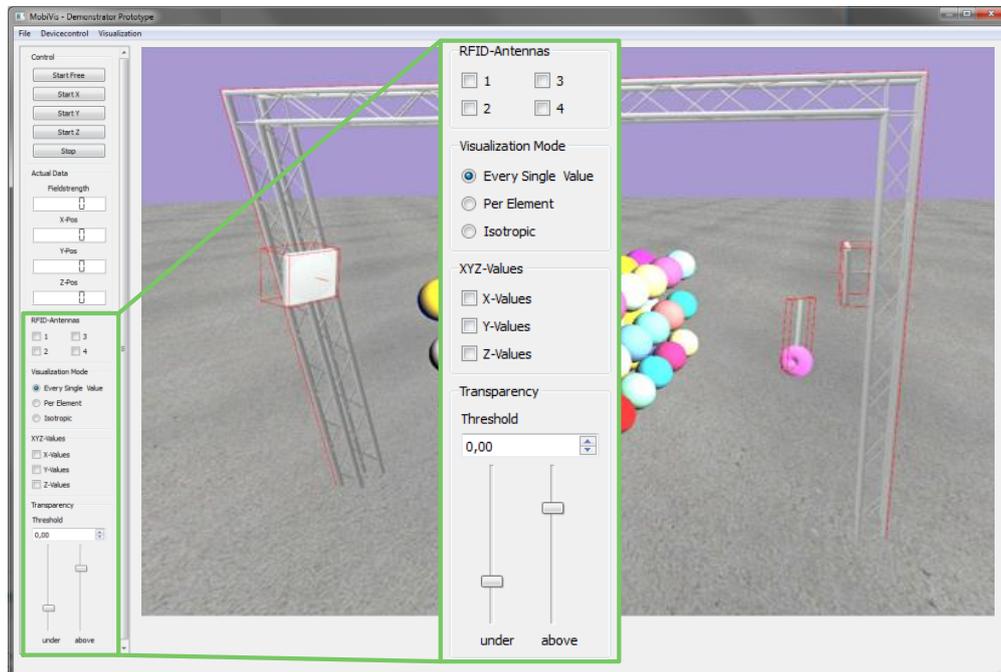


Abbildung 5-5: Steuerungselemente zur Visualisierung in der Benutzeroberfläche

Die Steuerungsmöglichkeiten zur Visualisierung sind in vier Gruppen unterteilt. Eine Beschreibung der Gruppen und der Einstellungsmöglichkeiten innerhalb der Gruppen findet sich in Tabelle 5-3.

Tabelle 5-3: Beschreibung der Gruppen zur Einstellung der Visualisierung

Steuerungsgruppe	Beschreibung
RFID-Antennas	Über die Auswahlkästchen 1 bis 4 können die Messwerte zu den RFID-Antennen mit in die Visualisierung einbezogen oder ausgeschlossen werden.
Visualization Mode	In diesem Gruppenfeld ist die Auswahl des Visualisierungsmodus möglich: - Every Single Value: Visualisierung jedes einzelnen Messwertes - Per Element: Darstellung gemittelter Werte pro Quaderelement - Isotropic: Darstellung eines isotropen Wertes pro Quaderelement
XYZ-Values	Die Auswahl in diesem Bereich beschränkt die dargestellten Messwerte auf diejenigen, die entlang der ausgewählten Achsen gemessen sind.
Transparency	In diesem Bereich können Transparenzwerte gesetzt werden. Dazu wird ein Schwellwert festgelegt und danach kann über die Schieberegler die Transparenz der angezeigten Werte oberhalb und unterhalb des Schwellwertes verändert werden.

Durch die Auswahl der verschiedenen Optionen zur Darstellung der dreidimensionalen Visualisierung können verschiedene Untersuchungsaspekte herausgearbeitet werden. Mit der Auswahl der Antennen können die Lesefelder zu jeder einzelnen Antenne, einer Kombination der Antennen oder allen Antennen zusammen dargestellt werden. Damit kann abgeschätzt werden, welchen Beitrag die einzelnen Antennen zum Lesefeld haben. Ggf. kann hierüber abgeschätzt werden, welche UHF-Antennen an der Installation unbedingt notwendig sind oder welche Antenne keinen wesentlichen Nutzen erbringt und daher entweder anders positioniert werden muss oder sogar entfallen kann.

Mit dem Visualisierungsmodus wird generell über die Darstellungsmethode entschieden. Die Einstellung zur Anzeige aller Werte (Every Single Value) kann mitunter ein unübersichtliches Ergebnis liefern (siehe Abbildung 5-6, links). Die einzelnen Messwerte werden über farbige Tori entsprechend der Pose der Messantenne bei der Aufnahme des Wertes angezeigt. Die Färbung der Tori erfolgt analog zur Echtzeitvisualisierung während der Messung. Werden alle Tori angezeigt, so überlagern sich diese und es entsteht ein schwer zu interpretierendes Bild. Wenn aber ein Schwellwert gesetzt wird und Transparenzeinstellungen vorgenommen werden, können wichtige Erkenntnisse zum Lesefeld mit diesem Darstellungsmodus gewonnen werden. Wird der Schwellwert beispielsweise auf die Ansprechfeldstärke des verwendeten Transponders eingestellt und die Darstellung oberhalb dieses Wertes auf volle Transparenz eingestellt, so werden nur die Messpunkte mit den für die Er-

fassung kritischen Werten angezeigt (siehe Abbildung 5-6, rechts). Schwachstellen im Lesefeld können dadurch über einzelne Messwerte detektiert werden. Wird nicht mit voller Transparenz gearbeitet, so kann erkannt werden, ob und wo die Messpunkte mit geringen Werten vom Untersuchungsvolumen eingeschlossen werden. Zur Untersuchung von Überreichweiten kann analog zu diesem Verfahren vorgegangen werden. Dazu müssen lediglich die Transparenzeinstellungen getauscht werden.

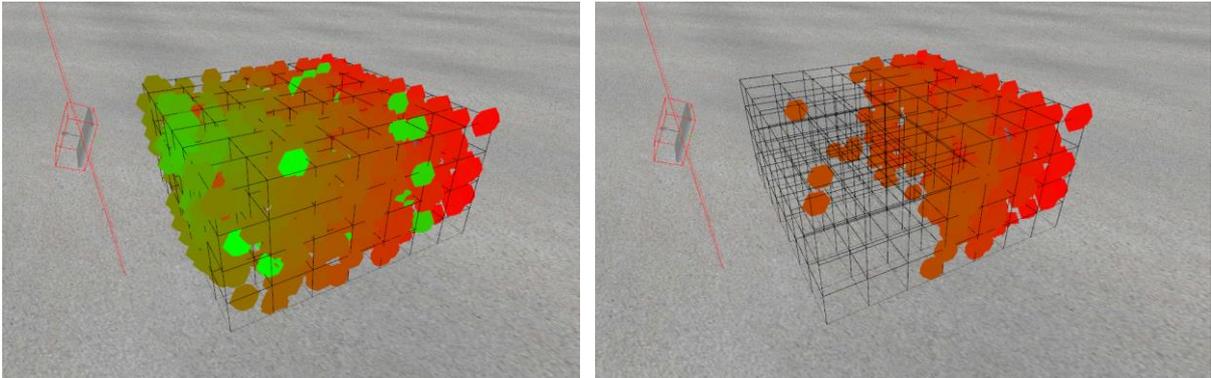


Abbildung 5-6: Screenshot zum Darstellungsmodus „Every Single Value“ ohne (links) und mit ein-
gestellter Transparenz (rechts) zur Darstellung von Lesefeldschwachstellen

Der Modus „Per Element“ bereitet die Messwerte derart auf, dass ein stellvertretender Feldstärkewert E_{C_e} pro gemessenem Quaderelement e dargestellt wird (siehe Abbildung 5-7). Dies erzeugt eine übersichtliche Darstellung zum Lesefeld im gesamten Messvolumen auf Basis mehrerer Feldstärkewerte. Zur Berechnung der repräsentativen Werte pro Quaderelement werden gewichtete arithmetische Mittelwerte aus den gemessenen Feldstärken $E(p_{e_i})$ im jeweiligen Element gebildet. Da der stellvertretende Wert im Zentrum C_e des Quaderelements liegt, wird das Gewicht $w(p_{e_i})$ anhand der Entfernung der Einzelmessung i innerhalb des Quaderelements zum Zentrum berechnet. Die repräsentativen Feldstärkewerte E_{C_e} werden mit Formel (5-6) berechnet.

$$E_{C_e} = \frac{\sum_{i=1}^n E(p_{e_i}) * w(p_{e_i})}{\sum_{i=1}^n w(p_{e_i})} \quad (5-6)$$

Mit Formel (5-7) werden die Gewichte $w(p_{e_i})$ zu den Messpunkten p_{e_i} über die Abmessungen des Quaderelements l , b und h berechnet.

$$w(p_{e_i}) = 1 - \frac{|p_{e_i} - C_e|}{\sqrt{\left(\frac{l}{2}\right)^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2 + \left(\frac{h}{2}\right)^2}} \quad (5-7)$$

Im Modus zur Anzeige eines Wertes pro Element werden die Messungen entlang der Raumachsen dargestellt. Die Berechnung der Mittelwert erfolgt also jeweils zu Werten der X-, Y- und Z-Achse. Für jeden der drei Mittelwerte kann ein gefärbter Torus mit entsprechender Orientierung in der Mitte des Elements dargestellt werden. Die Auswahl der dargestellten Werte erfolgt über die Auswahlkästchen „XYZ-Values“. Sind mehrere Achsen angewählt, werden die Tori überlagert dargestellt. Da sich die einzelnen Tori an der gleichen Stelle befinden, bleibt hierbei die Übersichtlichkeit erhalten. Auch in diesem Modus können Transparenzeinstellungen getätigt werden und Elemente mit geringen oder hohen Feldstärkewerten herausgestellt werden. Der Nutzen dieses Modus liegt vor allem in der Beurteilung des Lesefeldes bezogen auf die Ausrichtung der Transponder. Dies ist angesichts der ähnlichen Richtcharakteristik von dipolartigen Transpondern und der Messantenne gut möglich.

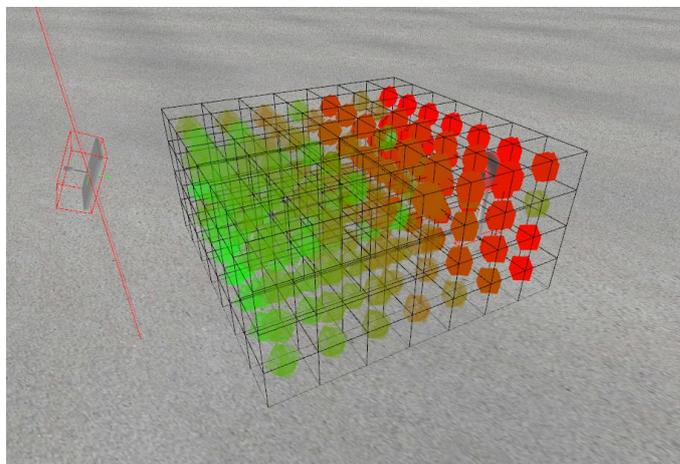


Abbildung 5-7: Screenshot zum Darstellungsmodus „Per Element“ mit Transparenzeinstellungen zur Hervorhebung der Bereiche mit niedrigen Feldstärkewerten

Mit dem dritten Visualisierungsmodus „Isotropic“ (siehe Abbildung 5-8) lassen sich aus den Einzelwerten berechnete isotrope Feldstärkewerte anzeigen. Dazu werden Werte entsprechend der Formel (5-8) zur Berechnung isotroper Werte mit uniaxialen Messantennen ermittelt [Suá-2009]. Der isotrope Feldstärkewert $E_{C_{e_{iso}}}$ wird über den vektoriellen Betrag aus den Messwerten entlang der Achsen ($E_{C_{e_x}}, E_{C_{e_y}}, E_{C_{e_z}}$) gebildet.

$$E_{C_{e_{iso}}} = \sqrt{E_{C_{e_x}}^2 + E_{C_{e_y}}^2 + E_{C_{e_z}}^2} \quad (5-8)$$

Mit diesem Visualisierungsmodus kann ein Überblick zur Homogenität des Feldes gewonnen werden. Es ergibt sich eine klare übersichtliche Visualisierung, die pro Quaderelement eine Kugel enthält, die durch ihre Färbung die Gesamtheit aller achsenbezogenen Messwerte repräsentiert. Analog zu den anderen Modi können bei

dieser Ansicht zu den Messwerten ebenso Transparenzeinstellungen vorgenommen werden.

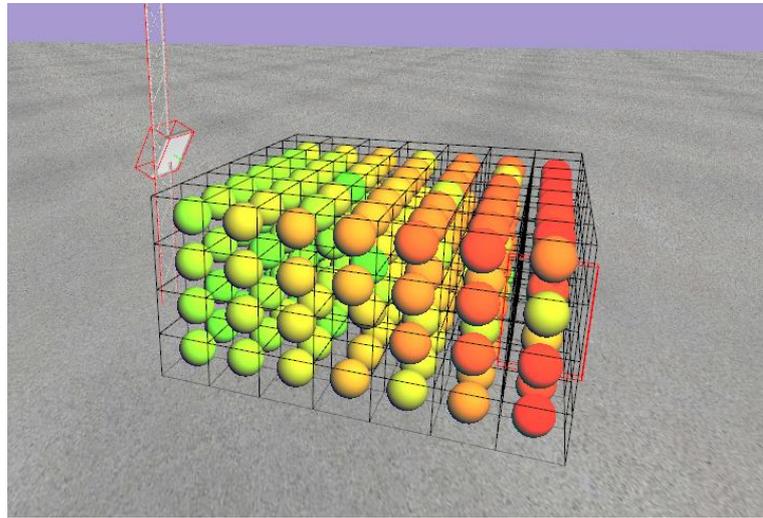


Abbildung 5-8: Screenshot zum Darstellungsmodus isotroper Feldstärkewerte

6 Evaluation und Validierung der Messkonzepte

In diesem Kapitel sind die Tests und Ergebnisse zur Evaluation und Validierung der Messkonzepte dokumentiert. Hierdurch wird eine Aussage hinsichtlich der Eignung der Komponenten des Low-Cost-Systems gewonnen. Darüber hinaus findet sich im Folgenden ein Vorschlag für die Erweiterung einer von der Organisation EPCglobal entwickelten Testmethode zur Feldstärkemessung an RFID-Portalen.

6.1 Evaluation der Systemvarianten

6.1.1 Evaluation der HF-Komponenten

Eine wichtige Voraussetzung für die Evaluation der HF-Komponenten ist eine zeitlich konstante Feldstärkeverteilung während der Durchführung von Messungen. Somit liegt bei den Vergleichsmessungen der alternativen Messkomponenten jeweils dieselbe Feldstärke an den definierten Messpositionen vor. Dabei stellt die Volatilität des elektromagnetischen Feldes eine wesentliche Herausforderung dar. So ergibt sich bei kleinsten Änderungen in der Umgebung eine andere Feldausbreitung und dadurch eine geänderte Feldstärke in einem Messpunkt. Auch bei statischer Umgebung bleibt die Beeinflussung des Feldes durch den Benutzer des Systems bestehen. Dieser müsste demnach bei der Messung exakt dieselbe Position einnehmen. Folglich ist bei der Interpretation der Unterschiede einzelner Messungen zu berücksichtigen, dass diese nicht nur auf die jeweils verwendeten Komponenten zurückgeführt werden können.

Ein theoretischer Ansatz ist demzufolge die parallele bzw. zeitgleiche Messung mit den alternativen Messsystemen. Hierzu muss jedoch dieselbe Messantenne verwendet werden, da deren individuelle Kalibrierungsfaktoren bzw. Kenndaten die Messung wesentlich beeinflussen. Des Weiteren ist eine exakt zeitgleiche Ansteuerung der HF-Komponenten softwaretechnisch nicht möglich. Somit können minimale Unterschiede der Messzeitpunkte nicht vermieden werden, was den Vergleich der gemessenen Feldstärken einschränkt. Der Ansatz der zeitgleichen Messung ist daher nicht praktikabel und folglich nicht weiter zu verfolgen.

Um dennoch einen Vergleich der Messsysteme durchführen zu können, wird das Equipment der Forschungsstelle genutzt. Für Leistungsmessungen von Transpondern steht dort eine Messkammer, also ein reflexionsarmer Raum, in dem sich das Feld stets in nahezu gleicher Weise verteilt, zur Verfügung (siehe Abbildung 6-1).

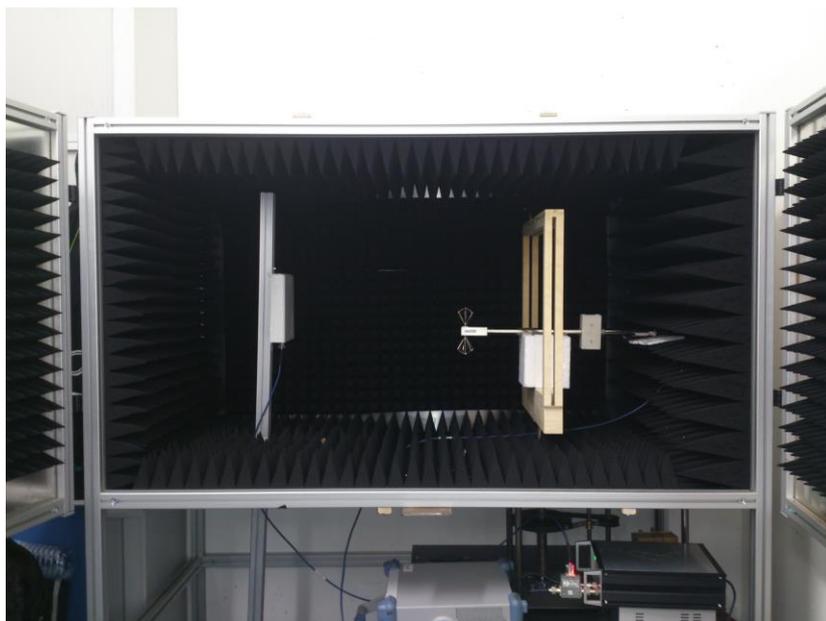


Abbildung 6-1: Testaufbau zum Vergleich der Messsysteme in der Messkammer [fml-2014]

Als Signalquelle und System zur Referenzmessung wird das Messsystem *Tagformance Lite* eingesetzt. Dieses vermisst zur Kalibrierung einen Referenztransponder, dessen genaue Kenndaten im System hinterlegt sind. Durch die Kalibrierung werden sämtliche Einflüsse der Übertragungsstrecke ermittelt. In Kombination mit der genauen Leistungsausgabe des Messsystems (absolute Genauigkeit 1 dB [Voy-2011]) lässt sich daraufhin die genaue Feldstärke am Referenztransponder anhand dessen Antwortsignalen ermitteln. Um anschließend die beiden HF-Messkomponenten des Systems *MobiVis* zu vergleichen, wird zunächst der Referenztransponder durch die Messantenne dieses Systems ersetzt. Bei unverändertem Ausgangssignal (des *Tagformance Lite*) wird daraufhin die Feldstärke mit beiden Systemvarianten gemessen. Aus dem Vergleich der Messreihen mit der Referenzmessung können schließlich Aussagen hinsichtlich der Eignung abgeleitet werden (siehe Tabelle 6-1).

Tabelle 6-1: Ergebnisse der Vergleichsmessungen mit den Leistungsmesssystemen

Tagformance Lite	Spektrumanalysator mit bikonischer Antenne	Power-Sensor mit bikonischer Antenne
1,99 V/m	2,02 V/m	1,91 V/m

Obwohl keine exakten Rückschlüsse auf die absolute Genauigkeit der Messsysteme vorliegen, kann dennoch gezeigt werden, dass die durch das *Tagformance Lite* ermittelte Feldstärke am Referenztransponder weitestgehend mit den Messungen der Systeme übereinstimmt.

Für den umfassenden Vergleich der Systeme gilt es, neben der Feldstärkemessung auch die für die Durchführung einer Messung benötigte Zeit zu betrachten. Hierbei ist zusätzlich zu den Angaben der Hersteller auch der Zeitaufwand für die Kommunikation der Software mit der Hardware zu berücksichtigen, was durch eine softwareinterne Zeitmessung realisiert ist. Mit jeder der beiden Variante werden 100 Zeitmessungen durchgeführt. Tabelle 6-2 zeigt die gemittelten Zeitbedarfe $\Delta\bar{t}_{HF}$ für die Messung inklusive Kommunikation mit der Hardware.

Tabelle 6-2 gemittelter Zeitbedarf für eine Messung inklusive Datenaustausch

	Power-Sensor	Spektrumanalysator
Mittelwert Messzeit $\Delta\bar{t}_{HF}$	30 ms	28 ms

Der Zeitbedarf des Power-Sensors entspricht mit 30 ms den Herstellerangaben. Im Vergleich hierzu weist der Spektrumanalysator einen mit 2 ms unwesentlichen geringeren Zeitbedarf auf. Folglich bieten beide Varianten eine ausreichende Grundlage zur Einhaltung der geforderten zehn Messungen pro Sekunde mit dem Gesamtsystem.

6.1.2 Evaluation der Trackingsysteme

Die Evaluation der Trackingsysteme wird in der Versuchshalle der Forschungsstelle durchgeführt. Dort herrschen alle relevanten Störeinflüsse auf die Leistungsfähigkeit der Systeme vor. Hierzu zählen vor allem unterschiedliche Beleuchtungssituationen und Lichtverhältnisse.

Wie in Abbildung 6-2 dargestellt, werden die Trackingsysteme an einem eigens hierfür aufgebauten RFID-Gate evaluiert. Um einen parallelen Einsatz der Trackingsysteme zu ermöglichen sind deren Kameras teils gemeinsam auf Stativen angebracht (siehe Abbildung 6-3). Damit die Pose der Messantenne von beiden Systemen gleichzeitig erfasst werden kann, befinden sich die beiden Trackingmarker untereinander an der Antenne (siehe Abbildung 6-4). Die erfasste Messantenne wird mit Hilfe einer Vorrichtung aus Holz, welche das elektromagnetische Feld kaum beeinflusst, an verschiedene Positionen im Messraum gehalten (siehe Abbildung 6-5). Damit beide Systeme mit dem gleichen Bezugs-KOS arbeiten, werden die Trackingmarker, die jeweils das Welt-KOS repräsentieren, derart zueinander positioniert, dass Ursprünge und Ausrichtung der KOS bestmöglich übereinstimmen (siehe Abbildung 6-6).

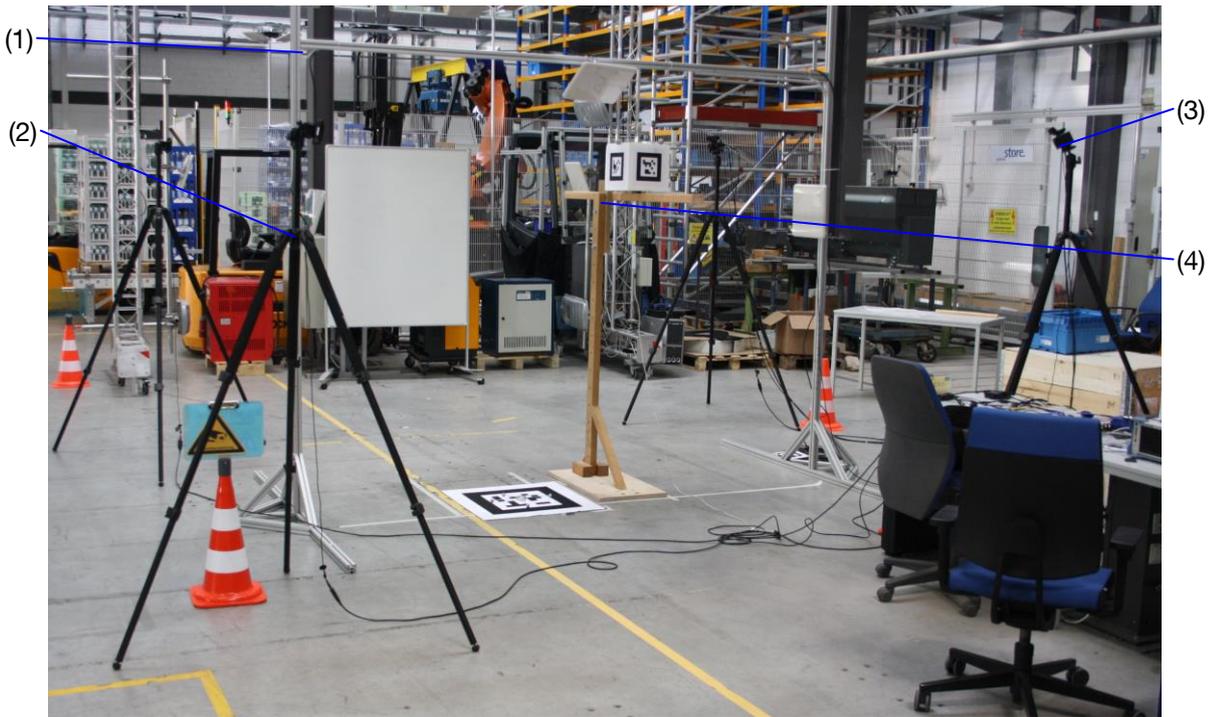


Abbildung 6-2: Gesamtaufbau zur Validierung der Trackingsysteme in der Versuchshalle der Forschungsstelle: (1) RFID-Gate, (2) Stative zum Aufbau der Trackingsysteme, (3) kombinierte Anbringung von State-of- und Low-Cost-Kameras, (4) Vorrichtung zur Positionierung der Messantenne



Abbildung 6-3: Parallelinstallation der Kameras: (1) USB-Kamera, (2) ART-Trackingkamera

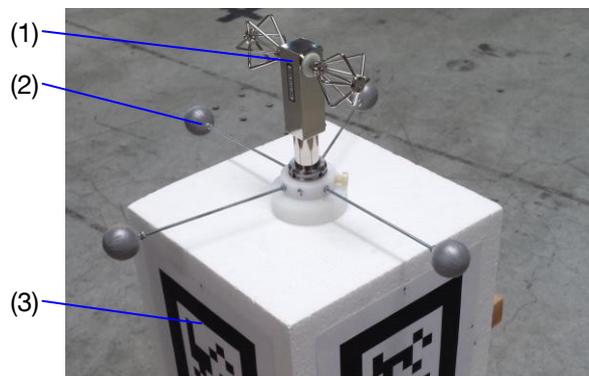


Abbildung 6-4: Markersetup an der Messantenne zur Evaluation: (1) bikonische Messantenne, (2) IR-Traget, (3) Papiermarker



Abbildung 6-5: Vorrichtung zur Antennenpositionierung: (1) Querbalken zur horizontalen Positionierung, (2) Höhenverstellung

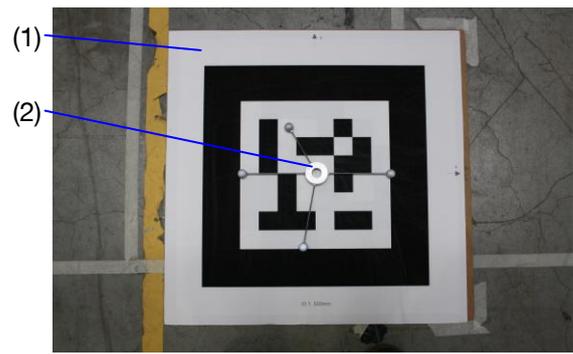


Abbildung 6-6: Kombinierte Anbringung Welt-KOS: (1) Welt-Papiermarker, (2) Welt-Target

Mit dem beschriebenen Aufbau werden die Posen der Messantenne an 27 Messpunkten, die im Abstand von ca. 60 cm angeordnet sind, erfasst (siehe Abbildung 6-7). An jedem dieser Messpunkte werden 10 Messungen durchgeführt. Die Messpunkte ergeben schließlich analog zur Visualisierung des Messfortschritts einen gleichmäßig unterteilten Würfel (siehe Abschnitt 5.3.1, Abbildung 5-3). Zur statistischen Auswertung wird die Software Matlab zusammen mit Excel eingesetzt.

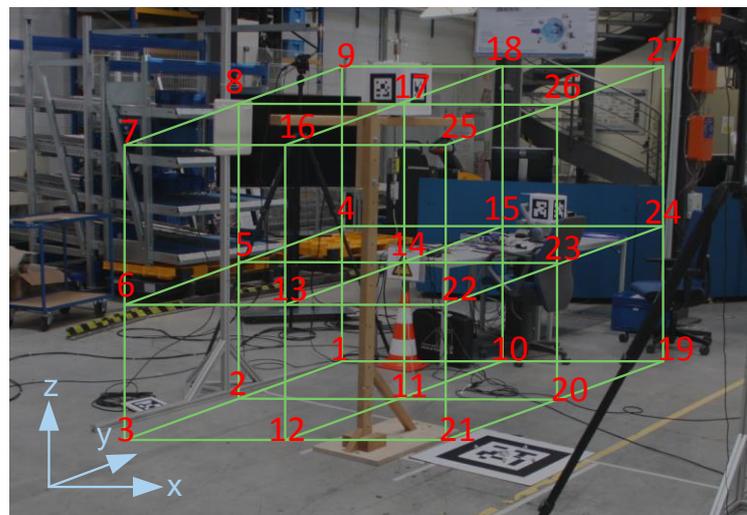


Abbildung 6-7: Anordnung der Messpunkte am Aufbau zur Evaluierung

Die Analyse der Schwankungen der von den Systemen gelieferten Posen erfolgt durch Betrachtung von Standardabweichungen. Hierzu wird zunächst für jede der zehn Messungen an einer Position die Standardabweichung bestimmt. Während beim State-of-the-Art-Trackingsystem die Ergebnisse für die verschiedenen Positionen nur geringfügig schwanken, ergeben sich beim Low-Cost-Trackingsystem positionsabhängig starke Schwankungen (siehe Tabelle 6-3), die zum Teil der Kalibrierung geschuldet sind. Kann die Posenschätzung jeweils nur aufgrund der Bilder ei-

ner Kamera erfolgen, so sind die Werte auf das von dieser bei der Kalibrierung ermittelte Welt-KOS bezogen. Ist diese Kamera zusätzlich weit von der Antenne entfernt, so geht abwechselnd ein mit unterschiedlichen Fehlern behaftetes Bezugs- bzw. Welt-KOS in die ermittelte Pose ein. Zusätzlich ist die Posenschätzung der einzelnen Kameras aufgrund des höheren Abstands von geringerer Qualität. Dies kann zu hohen Schwankungen der Messwerte führen (vgl. Position 20). Hingegen liegen an Positionen, an denen die Marker bzw. deren Pose von mehreren Kameras gut erkannt werden, geringere Schwankungen vor. Gleiches gilt für Positionen, die nur von einer Kamera, mit geringem Abstand zum Marker aufweist, erfasst werden (vgl. Position 7). Es lässt sich somit festhalten, dass bei der Verwendung des Systems auf die geeignete Verteilung und Ausrichtung der Kameras zu achten ist.

Tabelle 6-3: Schwankungen der Messwerte anhand der Standardabweichungen zu den Messwerten an den 27 Positionen

	maximale Standardabweichung S_{max} X / Y / Z (in mm)	minimale Standardabweichung S_{min} X / Y / Z (in mm)	durchschnittliche Standardabweichung S_0 X / Y / Z (in mm)
Low-Cost	Position 20: 32,65 / 39,87 / 13,31	Position 7: 0,96 / 1,48 / 0,20	13,97 / 26,68 / 7,08
State-of-the-Art	0,0022 / 0,0031 / 0,0021	0,0011 / 0,00075 / 5,76 E-05	0,0016 / 0,0014 / 0,0010

Die hohe Qualität des State-of-the-Art-Trackingsystems zeigt sich an den gemessenen Werten. So treten lediglich vernachlässigbare Wertschwankungen auf. Das System von ART weist zudem eine sehr hohe Genauigkeit auf. Nach Angaben des Herstellers weist das System einen Messfehler von 0,5 mm im Mittel und einen maximalen Messfehler von 1,5 mm auf. Diese kann mit der Low-Cost-Lösung nicht erreicht werden. Um dessen Genauigkeit zu beurteilen, werden die Messwerte positionsbezogen mit denen des ART-Systems verglichen.

An jeder der 27 Positionen werden hierzu die Abweichungen der zehn Positionswerte des Low-Cost-Systems zum vom ART-Trackingsystem ermittelten Positionswert berechnet. Aus diesen Abweichungen wird dann jeweils der quadratische Mittelwert (RMS) gebildet. In Tabelle 6-4 sind, analog zu Tabelle 6-3, der maximale, minimale und der durchschnittliche RMS-Wert der Positionsabweichungen gegeben.

Tabelle 6-4: Quadratisch gemittelte Positionsabweichungen

Δ_{max}	Δ_{min}	Δ_{\emptyset}
206,02 mm	52,11 mm	86,21 mm

Die deutlichen Unterschiede der RMS-Werte sind auf Bereiche im Messraum zurückzuführen, die für das gewählte Lösungskonzept zum Low-Cost-Tracking ungünstige Konstellationen zur Bestimmung der Pose darstellen. Es empfiehlt sich daher Messungen in diesen Bereichen zu vermeiden und dadurch die Genauigkeit der Messung zu steigern. Im Rahmen der Evaluation werden diese Bereiche für ein objektives Ergebnis bewusst mit in die Betrachtung einbezogen. Entsprechend der ermittelten Genauigkeit stellt das Low-Cost-Tracking für Untersuchungen, welche keine sehr hohe räumliche Auflösung benötigen, eine kostengünstige Alternative zum State-of-the-Art-Tracking dar.

Analog zur Evaluation der HF-Messkomponenten wird auch bei der Untersuchung der Trackingsysteme die beanspruchte Zeit für eine Messung inklusive dem Datenaustausch betrachtet. Der mittlere Zeitbedarf für die Systeme ist Tabelle 6-5 zu entnehmen. Beim Tracking mit Papiermarkern ist zu beachten, dass hier eine Abfrage der Posenwerte unter Einhaltung eines Zeitintervalls von 50 ms erfolgt. Dies lässt sich mit dem Aufbau des SW-Moduls des Low-Cost-Trackings und der niedrigen Wiederholrate (zehn Bilder pro Sekunde), mit der die Bilder von den USB-Kameras gelesen werden, begründen. Werden Posen in zu hoher Frequenz abgefragt, liegen keine neuen Bilder vor und das SW-Modul liefert daraufhin den zuletzt erfassten Wert. Da davon ausgegangen werden kann, dass zwei Kameras einen Marker erkennen und die Bilder zu unterschiedlichen Zeiten im System ankommen, reicht eine Wartezeit von 50 ms aus, um eine aktualisierte Pose zu erhalten. Dies wird durch die Messungen bestätigt, die bei bewegtem Objekt bzw. bewegter Antenne durchgeführt werden.

Tabelle 6-5: Mittlerer Zeitbedarf der Trackingsysteme pro Messung

	Low-Cost	State-of-the-Art
Mittelwert Messzeit $\Delta \bar{t}_{track}$	68 ms	16,7 ms

Das State-of-the-Art-Trackingsystem liefert entsprechend seiner angegebenen Bildwiederholrate 60 Bilder pro Sekunde. Die vom Papiermarker-Tracking benötigte Zeit von 68 ms stellt, vor allem unter Berücksichtigung der niedrigeren Bildwieder-

holrate der einzelnen Kameras und der beschriebenen Abfragebeschränkungen, einen akzeptablen Wert dar.

Abschließend ist hinsichtlich der Evaluierung der Trackingsysteme festzuhalten, dass mit beiden Systemen unter verschiedenen Lichtverhältnissen eine Bestimmung der Posen zuverlässig möglich ist.

6.2 Validierung der Systemvarianten und des Gesamtsystems

Zur Validierung der konzeptionierten Systemvarianten und des Gesamtsystems werden diese den in Kapitel 3 formulierten Anforderungen gegenübergestellt.

6.2.1 Hardwaretechnischer Aufbau des Systems

Bezogen auf den Aufbau ist die Mobilität bei beiden Systemen gegeben. Beim Low-Cost-System sind beide Komponenten zur Messung deutlich kompakter ausgeprägt, da im Vergleich zum ART-Tracking kein zusätzlicher Rechner benötigt wird. Zudem weist auch der Power-Sensor gegenüber dem Spektrumanalysator wesentlich geringere Abmaße auf. Beide Systeme lassen sich problemlos im Umfeld einer zu untersuchenden RFID-Installation aufbauen. Der Vorteil der kostengünstigen Variante liegt hier in der Realisierung des Trackings mit nur einer Kamera. Bei eingeschränktem Platzbedarf empfiehlt sich somit die Anwendung des Low-Cost-Systems. In Bezug auf die Robustheit der Systeme ist die Kommunikation des SW-Systems mit dem Papiermarker-Tracking über USB zu erwähnen. Bei Verwendung eines handelsüblichen Laptops kann es zu Engpässen in der Kommunikation sowie in der Leistungsversorgung der Kameras kommen.

Ein möglicher Ansatz zur Verbesserung des Systems besteht somit im Einsatz von Kameras mit Ethernet-Schnittstelle. Dadurch kann der USB-Bus des Rechners entlastet und eine robuste Kommunikation zwischen Kameras und SW-System gewährleistet werden. Obwohl derartige Kameras mit höheren Investitionen einhergehen, kann dennoch ein vergleichsweise günstiges System umgesetzt werden.

6.2.2 Nutzung des Systems zur Messung

Der Zeitbedarf bei der Vermessung einer RFID-Installation hängt von vielen Einflussfaktoren ab. Neben der Art und Weise wie das System eingesetzt wird und der Größe des untersuchten Messvolumens spielt auch die Auflösung, also die Anzahl der Messwerte je Volumeneinheit, eine wichtige Rolle. Wird die Messung mit dem System durchgeführt, indem der Nutzer die Antenne selbst durch den Raum führt, so

ist, im Vergleich mit der Positionierung der Messantenne über eine Halterung, mit einer wesentlich kürzeren Messdauer zu rechnen. Die sequenzielle Positionierung der Antenne hat dennoch gegenüber dem Stand der Technik den Vorteil, dass die Messwerte zur Installation mit der vorgestellten Lösung schneller und unkomplizierter erfasst werden. Bezüglich der Auflösung hat sich bei der Messung mit dem Funktionsdemonstrator zum System MobiVis gezeigt, dass hier hinsichtlich der Art und dem Bereich der RFID-Installation differenziert werden muss. So ist die geforderte Auflösung von einer Messung pro Kubikdezimeter zur Vermessung eines kompletten RFID-Gates für eine schnelle Vermessung ungeeignet. Bei richtiger Wahl der Auflösung kann mit beiden Konzepten eine mehrmalige Vermessung eines RFID-Gates innerhalb eines Tages erfolgen. Dabei ist anzumerken, dass die hohe Wiederholrate, mit der das State-of-the-Art-System einzelne Messwerte liefert, von der Low-Cost-Lösung nicht erreicht werden kann.

Obwohl bei den Trackingsystemen ein deutlicher Unterschied in der Leistungsfähigkeit der Systeme wahrzunehmen ist, stellt die Low-Cost-Lösung für viele Zwecke der Lesefeldanalyse eine geeignete Alternative dar. Dies trifft vor allem dann zu, wenn keine hohe Auflösung bei den Untersuchungen gefordert ist. Mit beiden Systemen kann, trotz der Line-of-Sight-Beschränkung, prinzipiell um Objekte bzw. Gegenstände im Erfassungsbereich getrackt werden, ohne das jeweilige System neu aufstellen zu müssen. Bei gegenüber aufgestellten Kameras kann mit dem Low-Cost-Trackingsystem mit lediglich zwei Kameras eine Posenerfassung auch bei Hindernissen im Untersuchungsraum erfolgen. Steht beispielsweise eine Gitterbox innerhalb beider Sichtkegel, so können die Marker an der Messantenne immer noch von mindestens einer Kamera detektiert werden und es ist die Schätzung einer Pose möglich.

6.2.3 SW-Konzept zur Lesefeldanalyse

Das entwickelte SW-Konzept bietet alle notwendigen Funktionalitäten zur Umsetzung der beschriebenen Messverfahren und zur Aufbereitung, Darstellung und Analyse der gewonnenen Messdaten. Zur Anbindung und Steuerung der Messtechnik werden entsprechende Schnittstellen entwickelt. Nach der Aufbereitung für die 3D-Visualisierung sieht das Konzept mehrere Darstellungsmöglichkeiten vor, die jeweils andere Aspekte der Lesefeldanalyse beleuchten. Neben der Visualisierung nach der Messung werden bereits während der Messung relevante Informationen, wie die aktuell gemessene Feldstärke und der Messfortschritt, an den Benutzer übermittelt. Die gestellten Anforderungen an das SW-Konzept werden somit erfüllt.

6.3 Möglichkeiten zur Erweiterung von EPCglobal Portal Field Strength Measurement Test Method

In [EPC-09b] wird eine Methode zur Messung der Feldstärke an RFID-Portalen beschrieben. Unter RFID-Portalen werden hier hauptsächlich RFID-Gates und RFID-Portalinstallationen an Fließbändern verstanden. Die beschriebene Testmethode soll Laboreinrichtungen und Endnutzern dienen, die eingesetzte RFID-Transponder testen. Im Dokument werden schwerpunktmäßig die Lage der Punkte zur Feldstärkemessung in Bezug auf das Portal (siehe Abschnitt 2.1.3), der Aufbau zur Messung, das Messequipment und dessen Nutzung sowie die Dokumentation der Messergebnisse beschrieben.

Allerdings wird darauf hingewiesen, dass die Methode die Messung von Leselöchern nicht berücksichtigt. Mit Hilfe der im Forschungsprojekt entwickelten Konzepte kann eine Erweiterung des Verfahrens zur Berücksichtigung von Leselöchern erfolgen. Durch die automatische Messung der Pose der Messantenne ist bei analogem Vorgehen eine wesentlich schnellere Erfassung der Messpunkte möglich. Dies gilt auch, wenn die Positionierung über eine Vorrichtung, wie in [EPC-09b] gezeigt, erfolgt. Die Zeitersparnis ergibt sich aus der automatischen Erfassung der Position, da eine manuelle Vermessung nicht möglich ist. Aus der einfachen und aufwandsarmen Möglichkeit zur Messung einzelner Punkte folgt die Möglichkeit, mehr Messpunkte als aktuell in der Methode beschrieben vorzusehen. Durch die Erhöhung der Messpunkte im Raum ist die Erfassung von Leselöchern darüber hinaus wahrscheinlicher.



Abbildung 6-8: Exemplarische Vorrichtung zur Positionierung der Messantenne nach [EPC-09b]

Außerdem ermöglicht die im Forschungsprojekt entwickelte Methode eine Voruntersuchung der für die Funktion des RFID-Aufbaus kritischen Lesefeldbereiche. Anhand der Visualisierung in Echtzeit können potenzielle Bereiche mit Lesefeldschwachstellen bei manueller Bewegung der Messantenne durch den Raum identifiziert werden. Nach der Identifikation dieser Bereiche können dort zusätzlich statische Messungen, wie in [EPC-09b] beschrieben, erfolgen.

7 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und Ausblick

Im Folgenden werden das Vorgehen und die erzielten Ergebnisse des Forschungsvorhabens zusammengefasst. Weiterhin wird der Nutzen der Ergebnisse aufgezeigt und ein Ausblick für weiteren Forschungsbedarf gegeben.

7.1 Zusammenfassung

Der Einsatz der UHF-RFID-Technologie zur automatischen Identifikation von Objekten in der Logistik schreitet immer weiter voran. Beim Aufbau zugehöriger UHF-RFID-Installationen ist es notwendig, die zuverlässige Erfassung der Transponder durch das RFID-System in einem definierten Lesebereich zu gewährleisten. Aktuelle Verfahren zum Nachweis der Lesequote der Transponder sind mit hohem Aufwand verbunden. Für eine schnellere Beurteilung der Lesequote ist es von großem Vorteil, die Verteilung der Feldstärke im elektromagnetischen Lesefeld des RFID-Systems zu kennen. Deshalb ist das Ziel dieses Forschungsvorhabens die Entwicklung einer Methode zur einfachen, mobilen und aufwandsarmen Erfassung von UHF-RFID-Lesefeldern. Der Methode liegt der Lösungsansatz zugrunde, schnell an vielen Punkten im Raum die vorherrschende Feldstärke zu messen. Die ermittelten Messdaten werden für die Analyse durch den Anwender in 3D visualisiert. Dafür wird ein Softwarekonzept mit grafischer Bedienoberfläche zur einfachen Steuerung entwickelt. Um schnell an vielen Punkte die Feldstärke messen zu können, wird ein Feldmesssystem zur Messung der Feldstärke und ein Trackingsystem zur Erfassung der Position, an dem die Feldstärke gemessen wird, kombiniert. Diese Kombination von Messsystemen wird im Projekt in zwei Varianten entwickelt, eine State-of-the-Art-Variante aus hochwertigen Komponenten aus dem Stand der Technik und eine Low-Cost-Lösung aus kostengünstigen Komponenten. Über den Vergleich der beiden Systeme kann eruiert werden, ob auch mit einem geringeren finanziellen Aufwand nutzbare Ergebnisse erzielt werden können.

Als Einsatzszenario für die zu entwickelnde Methode samt Messsystem zur Lesefeldanalyse wird das weitverbreitete RFID-Gate festgelegt. Dies geschieht analog zur Festlegung der Anforderungen mit den Partnern aus der Industrie. Aus den Anforderungen geht zum einen hervor, mit welcher Genauigkeit, Geschwindigkeit und in welcher Auflösung die Messsysteme arbeiten müssen, damit die erfassten Daten eine Analyse des Lesefeldes zulassen. Zum anderen wird der Aufbau derartiger

Messsysteme betreffend der Mobilitätseigenschaften beschrieben, damit eine Messung am Ort der RFID-Installation erfolgen kann. Seitens der Softwarekonzepte wird festgelegt, welche Funktionen wie erbracht werden müssen, sodass eine Benutzung des Systems und eine Beurteilung des gemessenen Lesefeldes erfolgen kann. Über eine Technologierecherche werden Messsysteme aus dem Stand der Technik ermittelt, welche die Anforderungen am besten erfüllen. Als Ergebnis wird im State-of-the-Art-Messkonzept mit einem optischen Trackingsystem basierend auf infrarotem Licht die Position einer bikonischen Messantenne erfasst. Diese nimmt die elektromagnetischen Wellen des Lesefeldes aus dem Raum der Installation auf und gibt sie zur Messung an einen Spektrumanalysator weiter. Bei der Low-Cost-Variante ersetzt diesen ein Power-Sensor, der ausschließlich zur Messung von hochfrequenter Leistung genutzt wird und deshalb einen geringeren Invest zur Folge hat. Die Aufnahme der hochfrequenten Strahlung wird wie bei der State-of-the-Art-Variante von der bikonischen Antenne übernommen. Die von der Antenne an den Leistungsmesser weitergegebene Leistung wird jedoch mittels eines Bandpassfilters auf den UHF-RFID-Frequenzbereich beschränkt. Das kostengünstige Trackingsystem wird mit mehreren Kameras und einer Softwarebibliothek zum optischen Tracking mit Papiermarkern konzipiert und aufgebaut. Die vergleichsweise niedrigen Kosten ergeben sich durch die Verwendung von Web-Cams aus dem Consumerbereich in Kombination mit der kostenfreien Softwarebibliothek der Metaio GmbH. Die erarbeiteten Konzepte zur Visualisierung in 3D vermitteln dem Anwender schon während der Messung erste Ergebnisse und den Fortschritt der Felderfassung. Im Anschluss an die Messung stehen dem Anwender dann verschiedene Methoden bereit, die je nach Untersuchungsaspekt entweder einzelne oder zusammengefasste Messwerte darstellen. Jede Darstellungsmethode lässt sich durch Veränderung der Ansicht sowie Transparenzeinstellungen weiter verfeinern. Als Grundlage für die Visualisierung in 3D werden die Messdaten mit Methoden zur Aufbereitung vorverarbeitet. Zum Abschluss des Forschungsvorhabens zeigt eine Evaluation, dass, obwohl das Low-Cost-Trackingsystem nicht die Genauigkeit des Infrarot-Trackingsystems erreicht, dennoch nützliche Informationen zum Lesefeld erfasst werden können. Zudem kann die Erfassung der Feldstärke mit einem reinen Leistungsmessgerät wie dem Power-Sensor in ähnlicher Qualität zum Spektrumanalysator geschehen.

7.2 Nutzen und industrielle Anwendungsmöglichkeiten

Große Unternehmen sind immer mehr bestrebt ihre Logistikprozesse unter Einsatz der RFID-Technologie weiter zu verbessern. Dies drängt auch Zulieferer dazu RFID in ihre Prozesse zu integrieren. Oft sind dies KMU ohne eigene Forschungsentwicklungen auf dem Gebiet der RFID. Die großen Investitionen, die teils im Zusammen-

hang mit der Einführung von RFID-Systemen getätigt werden müssen, stellen ein hohes Risiko für diese Unternehmen dar, denn die Funktionsfähigkeit und Zuverlässigkeit der Systeme kann nicht in detaillierter Form vorhergesagt werden. Diese Unternehmen können von den im Forschungsprojekt erarbeiteten Möglichkeiten der verbesserten Untersuchung und der schnelleren Optimierung von neu aufgebauten RFID-Installationen profitieren. Der reduzierte Aufwand und das geminderte Risiko bei der Integration von RFID-Systemen erleichtern den Anwendern den Einstieg in diese AutoID-Technologie. Die damit verbundenen Vorteile verbesserter Prozesse helfen dabei die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen zu sichern.

Ein direkter Nutzen aus den Forschungsergebnissen ergibt sich für RFID-Systemintegratoren. Der Anteil an KMU ist in dieser Branche laut Recherchen der Forschungsstelle hoch einzuschätzen. Diese müssen bei der Umsetzung von RFID-Projekten ihren Kunden festgelegte Lesequoten zusichern. Derartige Zusicherungen können nur für die Ausprägung des Aufbaus bzw. die Konfiguration zum Zeitpunkt der zugehörigen Tests gelten. Ergeben sich Änderungen im Aufbau oder den Randbedingungen, so kann dies eine entscheidende Beeinflussung des Lesefeldes und somit auch der Lesequote zur Folge haben. In diesen Fällen sind neue Tests nötig. Für Anbieter von RFID-Systemen erleichtern die entwickelten Konzepte eine schnelle und zuverlässige Vor-Ort-Untersuchung der Schwachstellen an den RFID-Installationen mit niedrigen Feldstärkewerten. Tests bzw. Messungen dieser Art können auch als Dienstleistung angeboten werden und somit ein Geschäftsfeld für Systemintegratoren und RFID-Beratungsunternehmen darstellen, welche oftmals KMUs sind. Die Möglichkeit zur Ergänzung der eigenen Geschäftsfelder um eine Dienstleistung zur Untersuchung und Optimierung von RFID-Installationen kann daher insbesondere für KMU einen Beitrag zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit darstellen.

7.3 Ausblick

Im Forschungsprojekt „RFID-MobiVis“ wird eine neuartige Methode zur Untersuchung der Lesefelder von UHF-RFID-Installationen entwickelt. Die Umsetzung der Methode in Form eines Funktionsdemonstrators zur Untersuchung von UHF-RFID-Installationen zeigt, dass durch die Vermessung des elektromagnetischen Lesefeldes der Prozess der Konfiguration von UHF-RFID-Systemen unterstützt wird.

Weiterer Forschungsbedarf liegt in der Entwicklung von Methoden zur Ableitung von konkreten Vorschlägen zur Optimierung der Konfiguration einer RFID-Installation auf

Basis von ermittelten Messdaten zum Lesefeld. Diese könnten dann in ein Systemkonzept integriert werden, das analog zum vorgestellten Funktionsdemonstrator aufgebaut ist. Für die Ableitung derartiger Methoden ist es erforderlich, die Ausbreitung der Lesefelder an RFID-Installationen nach den verschiedenen Konfigurationsmaßnahmen zu erfassen und zu vergleichen. Zusätzlich müssen die Messergebnisse den in Praxistests ermittelten Lesequoten gegenübergestellt werden, damit adäquate Maßnahmen zur Verbesserung der Erfassung von Transpondern identifiziert werden können. Die generierten Vorschläge zur Optimierung eines RFID-Systems können Anwendern mit weniger Erfahrung im Bereich der RFID-Technologie bei der erfolgreichen Einrichtung der zugehörigen Systeme unterstützen. Dies ebnet den Weg für die weitere Verbreitung der RFID-Technologie und ermöglicht somit eine fortschreitende Verbesserung von Logistikprozessen auf Basis von RFID.

Literaturverzeichnis

- [ART-2014a] ART - Advanced Realtime Tracking GmbH: Optical Tracking - Technology - ART Advanced Realtime Tracking, 2014. URL: <http://www.ar-tracking.com/technology/optical-tracking/> (Aufruf am 04.12.2014).
- [ART-2014b] ART - Advanced Realtime Tracking GmbH: Passive - Targets - Markers & Targets - Products - ART Advanced Realtime Tracking, 2014. URL: <http://www.ar-tracking.com/products/markers-targets/targets/passive/> (Aufruf am 04.12.2014).
- [ART-2014c] ART - Advanced Realtime Tracking GmbH: SMARTTRACK - Tracking Systems - Products - ART Advanced Realtime Tracking, 2014. URL: <http://www.ar-tracking.com/products/tracking-systems/smarttrack/> (Aufruf am 10.01.2015).
- [Bal-2005] Balzert, H.: Lehrbuch der Objektmodellierung - Analyse und Entwurf mit der UML 2 ; mit CD-ROM und e-learning-Online-Kurs. 2. Aufl Auflage. Heidelberg, München: Elsevier, Spektrum, Akad. Verl, 2005.
- [Ban-2007] Banerjee, S.; Jesme, R.; Sainati, R.: Performance Analysis of Short Range UHF Propagation as Applicable to Passive RFID. In: 2007 IEEE International Conference on RFID, 2007, S. 30–36.
- [Bos-2007] Bosselmann, P.: Planning and Analysis of UHF RFID Systems for Consumer Goods Logistics Using Ray Tracing Predictions. In: 2007 3rd European Workshop on RFID Systems and Technologies. [Piscataway, N.J., 2007, S. 1–10.
- [Bos-2010] Bosselmann, P.: Systemprojektierung und Bewertung von RFID-Anwendungen mit Hilfe von Ray Tracing. Hamburg: Kovač, 2010.
- [Bun-2006] Bundesnetzagentur: Frequenznutzungsplan der Bundesnetzagentur, 2006. URL: http://agz-ev.de/recht/_legacy/frequenznutzungsplan.pdf (Aufruf am 13.01.2015).
- [Bun-2008] Bundestag: Bundesgesetzblatt Teil 1, Nr. 6 - EMVGBundestag, 2008.

- [Bun-2014] Bundesnetzagentur: LTE und Digitale Dividende (2014)
- [Bus-1996] Buschmann, F.; Meunier, R.; Rohnert, H.; Sommerlad, P.; Stal, M.: Pattern-oriented software architecture - A system of patterns. 1. ed, 8. reprint Auflage. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 1996.
- [Cap-2009a] Capdevila, S.; Jofre, L.; Bolomey, J.; Romeu, J.: RFID array probe for EM-field measurements. In: Antennas and Propagation Society International Symposium, 2009. APSURSI '09. IEEE, 2009, S. 1–4.
- [Cap-2009b] Capdevilla, S.; Masud, M. M.; Serrano, R.; Aguasca, A.; Blanch, S.; Romeu, J.; Bolomey, J.; Jofre, L.: RFID based probes for EM field measurements. In: 3rd European Conference on Antennas and Propagation, 2009. Piscataway, NJ: EuCAP; European Conference on Antennas and Propagation, 2009.
- [CIS-2014] CISC Semiconductor GmbH: RFID Sensor Module, 2014. URL: <https://www.cisc.at/sensormodule.html> (Aufruf am 30.11.2014).
- [Coi-2002] Coinchon, M.; Salovaara, A.-P.; Wagen, J.-F.: The impact of radio propagation predictions on urban UMTS planning. In: IZS 2002 International Zurich Seminar on Broadband Communications, 2002, S. 32-1.
- [DIN EN 61000-4-3] DIN EN , 61000-4-3:2011: Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) - Teil 4-3: Prüf- und Messverfahren - Prüfung der Störfestigkeit gegen hochfrequente elektromagnetische Felder. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Berlin: Beuth.
- [Dob-2008] Dobkin, D. M.: The RF in RFID - Passive UHF RFID in practice. Amsterdam, Boston: Elsevier / Newnes, 2008.
- [Dör-2013] Dörner, R.; Broll, W.; Grimm, P.; Jung, B.: Virtual und Augmented Reality (VR / AR) - Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität. Berlin, Heidelberg: Imprint: Springer Vieweg, 2013.
- [Drä-2014] Dräger K.: Have RFID pilots become redundant?, 2014. URL: <http://www.rfidarena.com/2014/10/28/have-rfid-pilots-become-redundant.aspx> (Aufruf am 13.11.2014).
- [EPC-06a] EPC -06-1.1.4:05.04.2006: Dynamic Test: Conveyor Portal Test Methodology. EPCglobal.

- [EPC-06b] EPC -06-1.0.9:05.04.2006: Dynamic Test: Door Portal Test Methodology. EPCglobal.
- [EPC-09a] EPC -09-1.0.0:14.07.2009: Portal Field Strength Measurement Test Method Evaluation and Minimum Performance Recommendation (Draft). EPCglobal.
- [EPC-09b] EPC -09-1.2:14. 07.2009: Portal Field Strength Measurement Test Method For Applied Tag Performance Testing (Draft). EPCglobal.
- [ETS-2014] ETS-Lindgren: HI-6005 Electric Field Probe, 2014. URL: <http://www.ets-lindgren.com/all/HI-6005> (Aufruf am 30.11.2014).
- [Fia-2005] Fiala, M.: ARTag, a Fiducial Marker System Using Digital Techniques. In: 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05), 2005, S. 590–596.
- [Fin-2012] Finkenzeller, K.: RFID-Handbuch - Grundlagen und praktische Anwendungen von Transpondern, kontaktlosen Chipkarten und NFC. 6., aktualisierte und erweiterte Auflage Auflage. München: Hanser, Carl, 2012.
- [Fis-2008] Fischer, R.; Salfer, M.: Planung von RFID-gestützten Prozessen in der innerbetrieblichen Logistik:28.08.2008
- [fml-2014] Röckl, A.: Konzeption und Umsetzung eines softwaregesteuerten Messsystems zur Erfassung der elektromagnetischen Feldstärke an UHF-RFID-Installationen. Masterarbeit; fml - Lehrstuhl für Förder-technik Materialfluss Logistik, Technische Universität München. Garching, 2014. Betreut durch Dipl.-Ing. Johannes Lechner.
- [Fra-2012] Franz, A. M.; Servatius, M.; Seitel, A.; Hummel, J.; Birkfellner, W.; Bartha, L.; Schlemmer, H.-P.; Sommer, C. M.; Radeleff, B. A.; Kauczor, H.-U.; Meinzer, H.-P.; Maier-Hein, L.: Elektromagnetisches Tracking für die interventionelle Radiologie. In: Tolxdorff, T.; Deserno, T. M.; Handels, H.; Meinzer, H.-P. (Hrsg): Bildverarbeitung für die Medizin 2012. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012, S. 392–397.
- [Fra-2014a] Franz, A. M.; Schmitt, D.; Seitel, A.; Chatrasingh, M.; Echner, G.; Meinzer, H.-P.; Nill, S.; Birkfellner, W.; Maier-Hein, L.: Kabelloses elektromagnetisches Tracking in der Medizin. In: Deserno, T. M.; Handels, H.; Meinzer, H.-P.; Tolxdorff, T. (Hrsg): Bildverarbeitung für

die Medizin 2014. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014, S. 360–365.

- [Fra-2014b] Fraunhofer Institute for Factory Operation and Automation IFF: Motion Tracking with Inertial Sensors - Fraunhofer IFF. In: Fraunhofer Institute for Factory Operation and Automation IFF, 2014. URL: <http://www.iff.fraunhofer.de/en/business-units/measurement-testing-technology/motion-tracking.html> (Aufruf am 02.12.2014).
- [Gam-1995] Gamma, E.: Design patterns - Elements of reusable object-oriented software. Reading, Mass.: Addison-Wesley, ©1995.
- [Gün-2008] Günthner, W. A.; Fischer, R.; Salfer, M.: RFID in der Logistik - Werkzeuge zur Identifikation und Nutzung von RFID-Potenzialen. Zwischenbericht: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, 2008.
- [Gün-2010] Günthner, W. A.; Meissner, S.; Conze, M.; Fischer, R.: Stand und Entwicklung des RFID-Einsatzes in der Automobillogistik - Ergebnisse einer empirischen Studie. Garching: Lehrstuhl für Fördertechnik, Materialfluss, Logistik, Techn. Univ., 2010.
- [Gün-2011] Günthner, W. A.; Atz T.; Klaubert C.; Salfer, M.: RFID-MachLog - Methodik für UHF-RFID-Machbarkeitsstudien. Forschungsbericht fml - Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik. Technische Universität München, 2011.
- [Har-1989] Haralick, R. M.; Joo, H.; Lee, C.; Zhuang, X.; Vaidya, V. G.; Kim, M. B.: Pose estimation from corresponding point data. In: IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Jg. 19 (1989)6, S. 1426–1446.
- [Hoe-2011] Hoefinghoff, J.-F.; Jungk, A.; Knop, W.; Overmeyer, L.: Using 3D Field Simulation for Evaluating UHF RFID Systems on Forklift Trucks. In: IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Jg. 59 (2011)2, S. 689–691.
- [Hua-2004] Huang, Y.; Zhang, J. T.: Field measurements inside a reverberation chamber. In: IEEE Antennas and Propagation Society Symposium, 2004, 2004, S. 723–726.
- [Int-2009a] InterSense, I.: IS-1200_VisTracker_Datasheet, 2009 (Aufruf am 05.12.2014).

- [Int-2009b] InterSense Inc.: IS-900_Datasheet, 2009 (Aufruf am 05.12.2014).
- [ISO 18047-6] ISO , 18047-6:01.06.2006: Information technology - Radio frequency identification device conformance test methods, Part 6: Test methods for air interface communications at 860 MHz to 960 MHz. International Organization for Standardization.
- [ISO 18046] ISO 18046:01.11.2006: Informationstechnology - Automatic identification and data capture techniques - Radio frequency identification device performance test methods. International Organization for Standardization.
- [ISO 18046-1] ISO , 18046-1:2011: Informationstechnik. Leistungstestsverfahren für RFID-Einrichtungen. Testverfahren für die Systemleistung. International Organization for Standardization.
- [ISO 18046-2] ISO , 18046-2:2011: Informationstechnik. Automatische Identifikation und Datenerfassungsverfahren. Testverfahren für Leistungstests von RFID-Geräten. Testverfahren für die Leistung des Abfragesenders. International Organization for Standardization.
- [ISO 18046-3] ISO , 18046-3:2012: Informationstechnik. Automatische Identifikation und Datenerfassungsverfahren. Testverfahren für Leistungstests von RFID-Geräten. Testverfahren für RFID-Tags. International Organization for Standardization.
- [Kat-2009] Kathrein Werke KG: Die Luftschnittstelle bei UHF RFID in der Automatisierungsindustrie. Vortrag auf der Messe Euro ID in Köln:2009
- [Kau-2006] Kaufmann S.: Eine RFID-Standardlösung gibt es nicht, 2006. URL: <http://www.logistik-express.com/eine-rfid-standardloesung-gibt-es-nicht/> (Aufruf am 15.11.2014).
- [Kin-2005] King, S.: Making Better Electric Field Measurements. In: Conformity (2005)
- [Kuh-2012] Kuhrmann, M.: Prototyping — Enzyklopaedie der Wirtschaftsinformatik. Herausgegeben von: Kurbel, K.; Becker, J.; Gronau, N.; Sinz, J. E.; Suhl, L. Universität Potsdam, 2012. URL: <http://www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/lexikon/is-management/Systementwicklung/Vorgehensmodell/Prototyping> (Aufruf am 04.01.2015).

- [Min-2012] Mini-Circuits: USB Smart Power Sensor PWR-4GHS. Herausgegeben von: Mini-Circuits, 2012 (Aufruf am 10.01.2015).
- [Min-2013] Mini-Circuits: USB Synthesized Signal Generator. Herausgegeben von: Mini-Circuits, 2013. URL: <http://194.75.38.69/pdfs/SSG-4000HP.pdf> (Aufruf am 11.01.2015).
- [MIT-2008] MITSUGI, J.; TOKUMASU, O.: A Practical Method for UHF RFID Interrogation Area Measurement Using Battery Assisted Passive Tag. In: IEICE Transactions on Communications, E91-B (2008)4, S. 1047–1054.
- [Moj-2008] Mojix Inc.: RFID System - Mojix STAR | Supply Chain and Asset Management with Precision and Scalability. Herausgegeben von: Mojix Inc., 2008. URL: <http://www.mojix.com/products/index.php> (Aufruf am 25.11.2014).
- [Mue-2009] Muehlmann, U.; Manzi, G.; Wiednig, G.; Buchmann, M.: Modeling and Performance Characterization of UHF RFID Portal Applications. In: IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Jg. 57 (2009)7, S. 1700–1706.
- [Nar-2014] Narda Safety Test Solutions GmbH: Messung elektrischer Felder von 100 kHz bis 3 GHz. Herausgegeben von: Narda Safety Test Solutions GmbH, 2014. URL: https://www.narda-sts.com/de/safety/produkte/hochfrequenz/nbm-550/e-feld-3-ghz/index.php?eID=tx_nawsecuredl&u=0&file=/fileadmin/Produktliteratur_BAs_Software/NBM_520_550/Datenblatt/Sonden/ME-D0233C_EF0391_DS.pdf&t=1417457376&hash=99f88b2d927ac5489c6ebdccb87de5e427433b4a (Aufruf am 30.11.2014).
- [o.V-2008] o.V.: "Hexerei": Anwender verstehen RFID-Technologie nicht, 2008. URL: http://www.computerwoche.de/knowledge_center/scm_rfid/1861224/ (Aufruf am 14.11.2014).
- [o.V-2014] o.V.: Klein, aber oho - Aus vielen Prozessen der Intralogistik ist RFID mittlerweile nicht mehr wegzudenken. Aber was hält die Zukunft für diese Technologie noch bereit. Wir sprachen exklusiv mit führenden Köpfen der Intralogistik. In: Materialfluss (2014)4, S. 54–55.

- [Poh-2008] Pohl, K.: Requirements Engineering - Grundlagen, Prinzipien, Techniken. 2., korrigierte Aufl Auflage. Heidelberg: dpunkt-Verl., 2008.
- [Poh-2011] Pohl, K.; Rupp, C.: Basiswissen Requirements Engineering - Aus- und Weiterbildung zum "Certified Professional for Requirements Engineering" ; Foundation Level nach IREB-Standard. 3. korrigierte Aufl Auflage. Heidelberg: dpunkt-Verl., 2011.
- [Pre-2007] Preiner, P.; Schmid, G.; Lager, D.; Reinhard, G.: Bestimmung der realen Feldverteilung von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern in der Umgebung von WLAN-Einrichtungen in innerstädtischen Gebieten. Herausgegeben von: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Bonn, 2007. URL: http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/schriftenreihe_rs702.pdf (Aufruf am 25.11.2014).
- [Red-2005] Redemske, R. M.: An Electromagnetic Measurement Tool for UHF RFID Diagnostics. Master Thesis; Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, Institute of Technology. Massachusetts, 2005. Betreut durch Daniel W. Engels.
- [Rei-2009] Reif, R.: Entwicklung und Evaluierung eines augmented reality unterstützten Kommissioniersystems. München: FML, 2009.
- [Rit-2014a] Rittmann: Bandpassfilter, 2014. URL: <http://www.rittmann-hf-technik.de/0000009baa0f5a103.html> (Aufruf am 22.12.2014).
- [Rit-2014b] Rittmann-HF-Technik: Screenshot Kennlinie Bandpassfilter (2014)
- [Rob-2006] Robertson, S.; Robertson, J.: Mastering the requirements process. 2nd ed Auflage. Upper Saddle River, NJ: Addison-Wesley, 2006.
- [Roh-2013] Rohde & Schwarz: Product Brochure (deutsch) for R&S®FSL Spektrumanalysator, 2013. URL: http://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/FSL_bro_de_0758_2790_12_v0700.pdf (Aufruf am 03.01.2015).
- [Sch-2003] Schoof, A.; Stadtler, T.; ter Haseborg, J. L.: Simulation and measurement of the propagation of Bluetooth signals in automobiles. In: 2003 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2003. EMC '03, 2003, S. 1297–1300.

- [Sch-2007a] Schuh, G.; Gottschalk S.; Pulz, C.: Grenzen von RFID in der Produktion. In: Industrie Management (2007)5, S. 27–30.
- [Sch-2007b] Schwarzbeck D.: Mikrowellen Bikonusanterenne SBA 9113, 2007. URL: <http://schwarzbeck.de/Datenblatt/k9113.pdf> (Aufruf am 03.01.2015).
- [Sie-2000] Sietmann, R.: Mythos und Realität von Gesundheitsschäden durch elektronische Geräte. In: Heise Zeitschriften Verlag, 2000. URL: <http://www.heise.de/ct/artikel/Stoerfunk-fuers-Gehirn-287768.html> (Aufruf am 14.01.2015).
- [Sky-2008] SkyTec, I.: SkyePlus MXH and MXU Multiplexer Reference Guide. Herausgegeben von: SkyTec, I., 2008 (Aufruf am 11.01.2015).
- [Suá-2009] Suárez, J. M.: Anwendung der räumlichen Mittelung nach EN 50492. Taco (Tenerife), 2009. URL: https://www.narda-sts.com/de/safety/service/produktliteratur/hochfrequenz/index.php?eID=tx_nawsecuredl&u=0&g=0&t=1422129757&hash=b8656322215a16cfae1575404b219a24f4412ecb&file=/fileadmin/Produktliteratur_BAs_Software/Technische_Artikel_Allgemein/TA_HF_1035_D_Technical_Note_11_Raumlichen_Mittelung_nach_EN50492.pdf (Aufruf am 23.01.2015).
- [Thu-2008] Thumm, Manfred K. A; Wiesbeck, W.; Kern, S.: Hochfrequenzmesstechnik - Verfahren und Messsysteme. 2., durchges. Aufl. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2008.
- [Tön-2010] Tönnis, M.: Augmented Reality. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [Uys-2008] Uysal, D. D.; Emond, J.-P.; Engels, D. W.: Evaluation of RFID Performance for a Pharmaceutical Distribution Chain: HF vs. UHF. In: IEEE International Conference on RFID (IEEE RFID 2008) (2008), S. 27–34.
- [VDI 4472-10] VDI , 4472-10:2008-05: Anforderungen an Transpondersysteme zum Einsatz in der Supply Chain - Testverfahren zur Überprüfung der Leistungsfähigkeit von Transpondersystemen (RFID). VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik. Berlin: Beuth.
- [Voy-2011] Voyantic, L.: Tagformance Manual. Herausgegeben von: Voyantic Ltd., 2011 (Aufruf am 27.01.2015).

- [Wan-2011] Wang, Z.; Jin, R.; Jin, Y.: Path Loss Prediction for Mobile Digital TV Propagation Under Viaduct. In: IEEE Transactions on Broadcasting, Jg. 57 (2011) 1, S. 37–45.
- [Wei-2013] Weiss, A.: Projektgespräch - Trackingtechnologien zur Anwendung im Forschungsprojekt MobiVis. Garching:25.07.2013
- [Wel-2002] Welch, G.; Foxlin, E.: Motion tracking: no silver bullet, but a respectable arsenal. In: IEEE Computer Graphics and Applications, Jg. 22 (2002)6, S. 24–38.
- [You-1999] You, S.; Neumann, U.; Azuma, R.: Hybrid inertial and vision tracking for augmented reality registration. In: Virtual Reality, 1999. Proceedings., IEEE, 1999, S. 260–267.
- [Zha-2008] Zhang, H.; Rigelsford, J.; Low, L.; Langley, R. J.: Experimental Validation of Simulated 3D Field Distribution Within a Vehicle Cabin. In: The Institution of Engineering and Technology 7th International Conference on Computation in Electromagnetics. London, 2008, S. 195–196.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Ideales Antennenfeld einer UHF-Antenne (links) gegenüber einem realen Antennenfeld (rechts)	3
Abbildung 1-2:	Arbeitspakete des Forschungsprojekts im Zusammenhang mit einem Konzept für ein System zur mobilen RFID-Lesefelderfassung	6
Abbildung 2-1:	HF-Testkammer [ISO 18047-6]	11
Abbildung 2-2:	Beispiel für messbaren Erfassungsbereich bei Laborumgebung [ISO 18047-6]	11
Abbildung 2-3:	Messpunkte an einem Gate von oben [EPC-09b]	12
Abbildung 2-4:	Messpunkte an einem Gate von links [EPC-09b]	12
Abbildung 2-5:	Beispielhafte Messpunktdefinition für ein Gate nach [VDI 4472-10], links in der Frontalansicht, rechts in der Seitenansicht	13
Abbildung 2-6:	Schwankungen der Feldstärke in einem Gate [MIT-2005]	15
Abbildung 2-7:	Schwankung der Feldstärke entlang einer Kabelantenne (Messung am fml)	16
Abbildung 2-8:	Simulierte Feldverteilung vor einer UHF-Antenne ohne Umgebungseinfluss (oben) und mit Einfluss durch Waren (unten) [Kat-2009]	18
Abbildung 2-9:	Visualisierung der Feldstärke eines vertikal orientierten UHF-Strahlers in einem Raum [Dob-2008]	18
Abbildung 2-10:	Outside-In- und Inside-Out-Tracking am Beispiel eines Head-Trackings (Indizes $S \triangleq$ Sensor und $R \triangleq$ Referenz) [Rei-2009]	24
Abbildung 2-11:	Erfassungssituation bei optischem Tracking mit infrarotem Licht [Dör-2013]	25
Abbildung 2-12:	Target bestehend aus fünf passiven Markern [ART-2014b] (Kugeln mit retroreflektierender Beschichtung)	25
Abbildung 2-13:	Marker mit 2D-Muster für Tracking (angelehnt an: [Fia-2005])	26
Abbildung 2-14:	Flachmarker im Kamerabild	26
Abbildung 3-1:	Anwendungsfalldiagramm zur grundlegenden Funktionalität des System MobiVis	31
Abbildung 3-2:	Anwendungsfalldiagramm nach Konkretisierung und Ermittlung der Anforderungen	36
Abbildung 4-1:	Schematische Darstellung zum Gesamtsystem MobiVis zur Lesefeldanalyse	37
		121

Abbildung 4-2:	IR Tracking-System mit Stereokameraansatz [ART-2014c]	41
Abbildung 4-3:	Festes Messvolumen zum Stereokameratracking [ART-2014c]	41
Abbildung 4-4:	Anbringung der Trackingkameras auf einer Profilschiene zur Nutzung der Vorteile von Stereokamerasystemen	50
Abbildung 4-5:	Einsatz der Kameras auf separaten Stativen	50
Abbildung 4-6:	Standardtarget: (1) Standardplattform zur Montage von Markern (2) Kugelmarker mit \varnothing 12 mm	51
Abbildung 4-7:	Aufbau zum Tracking mit dem Standardtarget: (3) bikonische Antenne (4) Targethalterung	51
Abbildung 4-8:	Antennentarget: (1) Marker mit \varnothing 30 mm (2) Montagerring mit Fixierschraube	52
Abbildung 4-9:	Antenne mit montiertem Target	52
Abbildung 4-10:	Test des Referenztrackingsystems unter Einfluss von Tageslicht im Bereich des Eingangstores	52
Abbildung 4-11:	Aufbau zum Referenz-HF-Messsystem: (1) Spektrumanalysator R&S FSL 3, (2) High-End-HF-Koaxialkabel, (3) Bikonusantenne, (4) Rechner zur Fernsteuerung des Spektrumanalysators, (5) Ethernet-Verbindung zum Datenaustausch bzw. zur Kommunikation (angelehnt an [fml-2014])	54
Abbildung 4-12:	Zeitlicher Verlauf der Feldstärke erzeugt durch den Reader Impinj RDU-R420 im Modus Test Runs [fml-2014]	55
Abbildung 4-13:	Zeitlicher Verlauf der Feldstärke erzeugt durch den Reader Siemens RF670R bei Testeinstellungen zur Einzelmessung [fml-2014]	55
Abbildung 4-14:	Zeitlicher Verlauf des Signals vom Testsystem Tagformance Lite bei Ansteuerung über die eigene Softwareanwendung	56
Abbildung 4-15:	Screenshot der Benutzeroberfläche zum SW-Prototyp des Funktionsdemonstrators des Lesefeldanalysestests	57
Abbildung 4-16:	Vereinfachte Visualisierung der Messung auf Basis der Messdaten der Testsoftware	58
Abbildung 4-17:	Vorgehen zur Optimierung des Lesefeldes an UHF-RFID-Installationen durch Messung und Visualisierung des elektromagnetischen Feldes	59
Abbildung 4-18:	Skizze zum Inside-Out-Ansatz zur Erfassung der Messantennenpose	63
Abbildung 4-19:	Skizze zum Outside-In-Ansatz zur Erfassung der Messantennenpose	63

Abbildung 4-20:	Grundaufbau des Lösungsansatzes des Low-Cost-Trackingsystems	63
Abbildung 4-21:	Transformationen zum Low-Cost-Trackingkonzept	64
Abbildung 4-22:	Aufbau des Softwaremoduls zum Low-Cost-Tracking	67
Abbildung 4-23:	Konzept zur Erzeugung und Messung eines elektromagnetischen Feldes an einer UHF-RFID-Installation zur Analyse deren Konfiguration	70
Abbildung 4-24:	Konzept zur Signalerzeugung	72
Abbildung 4-25:	Komponenten der Feldstärkemessung	73
Abbildung 4-26:	Kennlinie des im Low-Cost-Konzept verwendeten BPF [Rit-2014b]	74
Abbildung 4-27:	Richtdiagramm der bikonischen Antenne zur E-Ebene bei 1GHz	77
Abbildung 5-1:	Architektur der Software zum System MobiVis	81
Abbildung 5-2:	Aufbau des Hauptfensters der Softwareanwendung zum System MobiVis: (1) Menüleiste zur grundlegenden Steuerung der Anwendung, (2) Bereich zur Steuerung der Messung, (3) Anzeige für aktuelle Messwerte, (4) Elemente zur Einstellung der Visualisierung, (5) Statusleiste zur Anzeige verbundener HW-Komponenten, (6) Unterfenster zur Ausgabe der 3D-Visualisierung	85
Abbildung 5-3:	Visualisierung des Messvolumens an der Installation vor der Messung: (1) Darstellung des Messvolumens mit Quaderelementen, (2) Modell der Installation, (3) Visualisierung der UHF-RFID-Antennen	88
Abbildung 5-4:	Visualisierung des Fortschritts der Messung: (1) Quaderelement mit geringer Anzahl an Messungen, (2) Quaderelement mit hoher Anzahl an Messungen, (3) Verschwundenes Quaderelement nach Erfassung einer ausreichenden Anzahl an Messwerten, (4) Darstellung der Messantenne an aktueller Pose	89
Abbildung 5-5:	Steuerungselemente zur Visualisierung in der Benutzeroberfläche	91
Abbildung 5-6:	Screenshot zum Darstellungsmodus „Every Single Value“ ohne (links) und mit eingestellter Transparenz (rechts) zur Darstellung von Lesefeldschwachstellen	93
Abbildung 5-7:	Screenshot zum Darstellungsmodus „Per Element“ mit Transparenzeinstellungen zur Hervorhebung der Bereiche mit niedrigen Feldstärkewerten	94
Abbildung 5-8:	Screenshot zum Darstellungsmodus isotroper Feldstärkewerte	95

Abbildung 6-1:	Testaufbau zum Vergleich der Messsysteme in der Messkammer [fml-2014]	98
Abbildung 6-2:	Gesamtaufbau zur Validierung der Trackingsysteme in der Versuchshalle des Lehrstuhl fml: (1) RFID-Gate, (2) Stative zum Aufbau der Trackingsysteme, (3) kombinierte Anbringung von State-of- und Low-Cost-Kameras, (4) Vorrichtung zur Positionierung der Messantenne	100
Abbildung 6-3:	Parallelinstallation der Ka-meras: (1) USB-Kamera, (2) ART-Trackingkamera	100
Abbildung 6-4:	Markersetup an der Messantenne zur Evaluation: (1) bikonische Messantenne, (2) IR-Traget, (3) Papiermarker	100
Abbildung 6-5:	Vorrichtung zur Antennenpositionierung: (1) Querbalken zur horizontalen Positionierung, (2) Höhenverstellung	101
Abbildung 6-6:	Kombinierte Anbringung Welt-KOS: (1) Welt-Papiermaker, (2) Welt-Target	101
Abbildung 6-7:	Anordnung der Messpunkte am Aufbau zur Evaluierung	101
Abbildung 6-8:	Exemplarische Vorrichtung zur Positionierung der Messantenne nach [EPC-09b]	106

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1:	Überblick zur Bewertung der Trackingsysteme	44
Tabelle 4-2:	Überblick zur Bewertung der Feldstärkemesssysteme	48
Tabelle 4-3:	Funkstandards mit Frequenzen nahe dem ETSI UHF-Frequenzband [Sie-2000, Bun-2006, Bun-2014]	74
Tabelle 4-4:	Einfluss der Signale aus den nahen Frequenzbereichen mit und ohne Filterung im Abstand von einem Meter	75
Tabelle 5-1:	Klassen der Datenhaltungsschicht	82
Tabelle 5-2:	Schnittstellen und Klassen zur Hardwareanbindung	84
Tabelle 5-3:	Beschreibung der Gruppen zur Einstellung der Visualisierung	92
Tabelle 6-1:	Ergebnisse der Vergleichsmessungen mit den Leistungsmesssystemen	98
Tabelle 6-2:	gemittelter Zeitbedarf für eine Messung inklusive Datenaustausch	99
Tabelle 6-3:	Schwankungen der Messwerte anhand der Standardabweichungen zu den Messwerten an den 27 Positionen	102
Tabelle 6-4:	Quadratisch gemittelte Positionsabweichungen	103
Tabelle 6-5:	Mittlerer Zeitbedarf der Trackingsysteme pro Messung	103