



Master Thesis

im Rahmen des

Universitätslehrganges „Geographical Information Science & Systems“
(UNIGIS MSc) am Interfakultären Fachbereich für Geoinformatik (Z_GIS)
der Paris Lodron-Universität Salzburg

zum Thema

„iBeacon – Genauigkeitsanalyse von Bluetooth-Low-Energy-Beacons zum Einsatz für Indoor-Positioning in ausgewählten Anwendungsfällen“

vorgelegt von

Florian Schneider

UP 10591, UNIGIS MSc Jahrgang 2013

Zur Erlangung des Grades

„Master of Science (Geographical Information Science & Systems) – MSc(GIS)“

Gutachter:

Ao. Univ. Prof. Dr. Josef Strobl

Graz, 30.11.2016

Erklärung der eigenständigen Abfassung der Arbeit

Ich versichere, diese Master Thesis ohne fremde Hilfe und ohne Verwendung anderer als der angeführten Quellen angefertigt zu haben, und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen ist. Alle Ausführungen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß übernommen wurden, sind entsprechend gekennzeichnet.

(Unterschrift)

(Ort, Datum)

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation.....	1
1.2	Problemstellung und Zielsetzung.....	2
1.3	Aufbau der Arbeit	3
2	Grundlagen	4
2.1	Location-Based-Services	4
2.2	Indoor-Location-Based-Services	4
2.3	Übersicht über Methoden der Positionsbestimmung	5
2.3.1	Lateration	5
2.3.2	Angulation	6
2.3.3	Fingerprinting	6
2.3.4	Proximity.....	6
2.4	Algorithmen zur Messung von Distanzen	7
2.4.1	Time-of-Arrival (TOA)	7
2.4.2	Time-Difference-of-Arrival (TDOA).....	7
2.4.3	Received-Signal-Strength (RSS)	8
2.5	Übersicht über Systeme zur Positionsbestimmung in Gebäuden	8
2.5.1	Pseudoliten	8
2.5.2	Kamera-basierte Systeme.....	9
2.5.3	Audio-basierte Systeme.....	9
2.5.4	Funk-basierte Systeme	10
2.6	Bluetooth	11
2.6.1	Bluetooth-Low-Energy (BLE).....	12
2.7	Beacons	14

2.7.1	iBeacon	14
2.7.2	Eddystone	16
3	Test der Beacons auf die Genauigkeit der Positionsbestimmung	21
3.1	Übersicht über Beacon Anbieter	21
3.1.1	Estimote Beacons	21
3.1.2	Beaconinside.....	26
3.1.3	blukii Beacons	27
3.1.4	Auswahl des Anbieters	28
3.2	Testsoftware zur Positionsbestimmung	29
3.2.1	Code der App zur Messung der Entfernung	31
3.3	Distanzmessung	33
3.3.1	Messung ohne Störquellen.....	34
3.3.2	Diskussion der Messergebnisse ohne Störquellen	50
3.3.3	Messung mit Störquellen	52
3.3.4	Diskussion der Messergebnisse mit Störquellen.....	65
3.3.5	Vergleich der Ergebnisse ohne und mit Störquellen.....	66
4	Anwendungsfälle für Indoor-Location-Based-Services	68
4.1	Messen.....	68
4.1.1	Anwendungsmöglichkeiten von Indoor-Positioning-Services.....	69
4.1.2	Anforderungen an die Positionsgenauigkeit	70
4.2	Museen	70
4.2.1	Anwendungsmöglichkeiten von Indoor-Positioning-Services.....	71
4.2.2	Anforderungen an die Positionsgenauigkeit	72
4.3	Shoppingcenter bzw. Einzelhandel	73
4.3.1	Anwendungsmöglichkeiten von Indoor-Positioning-Services.....	73
4.3.2	Anforderungen an die Positionsgenauigkeit	74

5	Gegenüberstellung der Anwendungsfälle zur Positionsgenauigkeit der Beacons ...	75
5.1	Informationen zu einem Messestand	75
5.2	Informationen zu einem Ausstellungsstück in einem Museum	76
5.3	Informationen zu einem Produkt in einem Geschäft	77
5.4	Indoor-Navigation	78
6	Zusammenfassung und Ausblick	80
6.1	Zusammenfassung	80
6.2	Ausblick	81
7	Literaturverzeichnis	82
8	Anhang.....	85
8.1	Tabellen mit den gemessenen Werten ohne Störquellen.....	85
8.2	Tabellen mit den gemessenen Werten mit Störquellen.....	94

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Beispiel einer Trilateration	5
Abbildung 2 Datenrate und Reichweite kabelloser Datenübertragungstechnologien (Gupta, 2013, p. 3).....	13
Abbildung 3 Verschiedene Beacons	14
Abbildung 4 iBeacon data field.....	15
Abbildung 5 Eddystone data field	17
Abbildung 6 Eddystone UID frame	18
Abbildung 7 Eddystone URL frame.....	18
Abbildung 8 Eddystone TLM frame	19
Abbildung 9 Eddystone EID Frame	20
Abbildung 10 Aufbau eines Estimote Beacons (Estimote, 2014)	22
Abbildung 11 User Interface zur Konfiguration von Sendintervall und Sendeleistung.....	23
Abbildung 12 Estimote Proximity Beacons (Estimote, 2012-2016)	24
Abbildung 13 Estimote Location Beacons (Estimote, 2012-2016)	24
Abbildung 14 Estimote Sticker (Estimote, 2012-2016)	25
Abbildung 15 Estimote Mirror (Estimote, 2012-2016).....	26
Abbildung 16 Beaconinside Beacon	26
Abbildung 17 Aufbau einer Beaconinside Beacons	27
Abbildung 18 blukii Beacon H, L und S	27
Abbildung 19 Screenshot der App.....	30
Abbildung 20 Skizze des Versuchsaufbaus ohne Störquellen (Estimote, 2014)	34
Abbildung 21 Skizze des Versuchsaufbaus mit Störquellen (Estimote, 2014)	52
Abbildung 22 Beispiel einer Navigationsapp für eine Messe (SiT Consult e.K., 2016).....	70
Abbildung 23 Beispiel einer App für ein Museum (Strobel, 2015).....	72
Abbildung 24 Beispiel einer App für ein Geschäft (Bremmer, 2014)	73

1 Einleitung

1.1 Motivation

Navigation mithilfe von GPS (Global-Positioning-System) ist in unserem Alltag kaum mehr wegzudenken. Wir verwenden es im Auto, um zum Ziel geleitet zu werden, beim Laufen um unser geleistetes Laufpensum aufzuzeichnen und zu analysieren, auf einem Segelboot, um die zurückgelegte Strecke zu dokumentieren. Es zeigt in Flugzeugen die aktuelle Position und die geflogene Route an; diese sind nur einige von etlichen anderen Beispielen zu den Einsatzmöglichkeiten.

Aufgrund der Tatsache, dass bei GPS die Positionsbestimmung mithilfe von Satelliten berechnet wird, eignet sich diese Methode in großen, freiliegenden Gebieten. Sobald man sich allerdings innerhalb von Gebäuden befindet, funktioniert die Positionsbestimmung aufgrund der Signaldämpfung durch Mauern oder Decken sehr schlecht oder auch gar nicht mehr.

Der Wunsch nach Navigations- oder Positionsbestimmungsmöglichkeiten innerhalb von Gebäuden ist in den letzten Jahren stark gestiegen. Folglich steigt auch die Nachfrage nach elektronischen, ortsbezogenen Diensten in Gebäuden.

Eine mögliche Technologie um ortsbezogene Dienste innerhalb von Gebäuden realisieren zu können sind Beacons. Die Firma Apple hat im Jahr 2013 diesen proprietären Standard unter dem Namen iBeacon vorgestellt. Beacons sind Bluetooth-Sender die einem Endgerät, das sich in der Nähe des Senders befindet, mitteilen, dass man sich in seiner Reichweite befindet. Mithilfe dieser Information ist es möglich, einem Empfänger ortsbezogene Daten mitzuteilen.

Auch die mittlerweile sehr weite Verbreitung von Smartphones und Tablets hilft dabei, die Entwicklung und den Einsatz von Beacons weiter zu entwickeln, da die notwendigen Empfangsgeräte schon vorhanden sind und keine weitere Hardware für den Benutzer notwendig ist.

1.2 Problemstellung und Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist eine Untersuchung der Genauigkeit der Entfernungsbestimmung zwischen Sender (Beacons) und Empfänger (Tablet) und eine Gegenüberstellung der Ergebnisse zu möglichen Anwendungen für ortsbezogene Dienste in Gebäuden. Die Forschungsfrage, die als Grundlage dieser Arbeit dient, lautet:

Sind Beacons geeignet, die Anforderungen an die Positionsgenauigkeit für die untersuchten Anwendungen zu erfüllen?

Dazu werde ich Messungen unter verschiedenen Voraussetzungen (ohne und mit Störquellen) und mit verschiedenen Parametern (Entfernung, Sendeintervall, Sendeleistung, Höhe) vornehmen und auswerten.

Ich werde in dieser Arbeit nur zweidimensionale Szenarien berücksichtigen, da bei den Anwendungsfällen davon ausgegangen wird, dass sich der Nutzer auf einer Ebene befindet. Der Übergang zwischen Stockwerken wird nicht extra behandelt, kann jedoch über die Signalstärke der Beacons bestimmt werden.

Zur Durchführung der Messung habe ich eine Android App programmiert, die die Distanz zu Beacons aufgrund der empfangenen Signalstärke berechnet.

Anschließend werden die Ergebnisse der Messungen den Anwendungsmöglichkeiten von Indoor Positionsbestimmungen gegenübergestellt.

Schließlich soll eine Evaluierung von Beacons zur Verwendung für Indoor-Positioning-Services in verschiedenen Anwendungsbereichen vorliegen, die aufgrund der Genauigkeit der Beacons zeigen soll, ob diese geeignet für die jeweiligen Anforderungen sind.

Störeinflüsse von anderen Funksignalen wie Wireless LAN oder Mobilfunksignalen werden in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

1.3 Aufbau der Arbeit

Am Anfang der Arbeit in Kapitel 2 erfolgt ein Überblick über die technischen Grundlagen, auf denen diese Arbeit aufbauen kann und ein gemeinsamer Wissensstand geschaffen wird.

Im nächsten Kapitel „Test der Beacons auf die Genauigkeit der Positionsbestimmung“ werden verschiedene Anbieter von Beacons vorgestellt und meine Entscheidung, welche Beacons ich ausgewählt habe, erläutert. Danach folgen eine Vorstellung der Testapp und anschließend die Messungen mit der Diskussion der Ergebnisse.

Im Kapitel „Anwendungsfälle für Indoor-Location-Based-Services“ werden verschiedene Beispiele vorgestellt, in denen der Bedarf von Indoor-Location-Based-Services vorhanden ist und es werden die Anforderungen an die Positionsgenauigkeit der einzelnen Anwendungen erläutert.

Im Kapitel „Gegenüberstellung der Anwendungsfälle zur Positionsgenauigkeit der Beacons“ werden die Ergebnisse der Distanzmessungen den Anforderungen für die Anwendungsfälle gegenübergestellt.

Im Kapitel „Zusammenfassung und Ausblick“ werde ich die Ergebnisse noch einmal zusammenfassen und einen Ausblick auf die Zukunft von Beacons geben.

2 Grundlagen

2.1 Location-Based-Services

Eine Definition von Location-Based-Services lautet:

„Services that integrate a mobile device’s location or position with other information so as to provide added value to a user.“ (Schiller & Voisard, 2004, p. 10)

Location-Based-Services sind demnach Dienste, die die Position oder den Ort eines mobilen Endgerätes verwenden, um ortsbezogene Informationen zur Verfügung zu stellen und dadurch einen Mehrwert zu generieren.

Das können zum Beispiel Informationen zu Sehenswürdigkeiten, Restaurants, Parkplätzen sein, oder aber auch die aktuelle Position auf einer Karte.

Man unterscheidet zwischen reaktiven und proaktiven Diensten (Küpper, 2005, p. 3).

Reaktive Dienste werden immer vom Benutzer explizit aktiviert. Dazu gehören zum Beispiel das Suchen von bestimmten Dienstleistern in der Nähe oder das Anzeigen seiner aktuellen Position auf einer Karte.

Im Gegensatz dazu werden proaktive Dienste automatisch durch bestimmte, ortsabhängige Ereignisse ausgelöst. Wenn sich der Benutzer zum Beispiel einer Sehenswürdigkeit nähert, bekommt er automatisch Informationen darüber.

2.2 Indoor-Location-Based-Services

Indoor-Navigation bezeichnet die Positionsbestimmung und –darstellung auf einer Karte in geschlossenen Gebäuden beziehungsweise Räumen.

Im Gegensatz zu Outdoor-Navigation, für die es schon seit dem 2. Weltkrieg Systeme gibt, ist die Indoor-Navigation ein noch relativ junges Gebiet. Satellitennavigationssysteme wie GPS (Global-Positioning-System) funktionieren mittels empfangener Radiowellen, die von Satelliten an einen Empfänger gesendet werden. Da Satellitensignale durch Mauern, etc. geschwächt oder ganz blockiert werden, ist GPS innerhalb von Gebäuden nicht brauchbar. Aus diesem Grund müssen andere Methoden und Ansätze gefunden werden, um Indoor-Navigation zu ermöglichen (Werner, 2014, p. 6).

2.3 Übersicht über Methoden der Positionsbestimmung

Es gibt verschiedene Methoden, um die Position mittels Messungen zu bestimmen.

2.3.1 Lateration

Bei der Lateration wird die Position eines mobilen Gerätes berechnet, indem die Distanzen zu Punkten mit bekannter Position gemessen werden.

Für eine 2D-Positionsbestimmung sind mindestens drei Referenzpunkte notwendig, für eine 3D-Positionsbestimmung sind vier Referenzpunkte notwendig.

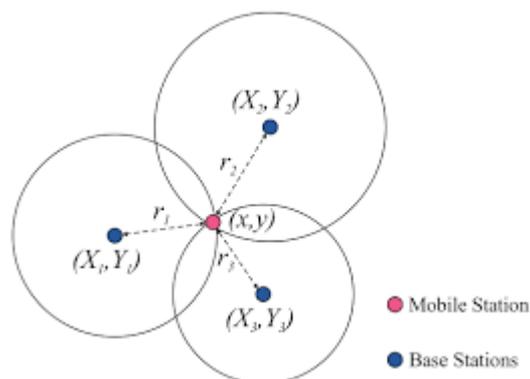


Abbildung 1 Beispiel einer Trilateration

In Abbildung 1 sieht man, wie die Position eines mobilen Gerätes durch die Messung der Distanzen zu drei fixen Punkten bestimmt werden kann (Werner, 2014, pp. 76-77).

2.3.2 Angulation

Bei der Angulation werden im Gegensatz zur Lateration, neben der Distanz auch die Winkel zu fixen Punkten gemessen, von denen die Position bekannt ist, um die Position des mobilen Gerätes zu bestimmen. Für eine zweidimensionale Ortsbestimmung benötigt man eine Länge und zwei Winkel. Für eine dreidimensionale Positionsbestimmung ist ein weiterer Winkel notwendig (Werner, 2014, pp. 81-82).

2.3.3 Fingerprinting

Das Prinzip von Fingerprinting beruht auf der Reproduzierbarkeit von Mustern von messbaren Variablen wie zum Beispiel der Signalstärke. Das Verfahren kann in zwei Phasen eingeteilt werden, in die Offline- und in die Online-Phase.

In der Offline-Phase (Trainingsphase) wird eine Karte für das Fingerprinting erstellt. Dazu werden Signalstärken von fixen Stationen (Basisstationen) von einer festgesetzten Anzahl von Punkten innerhalb eines Gebäudes gemessen und in einer Datenbank gespeichert.

In der Online-Phase werden die Signalstärken von den Basisstationen von einem mobilen Gerät gemessen und dann mit den Einträgen in der Datenbank verglichen. Durch den Eintrag mit der größten Ähnlichkeit wird die Position bestimmt (Meng, et al., 2011).

2.3.4 Proximity

Proximity beschreibt eine Art der Positionsbestimmung, die ausschließlich auf der Nähe eines mobilen Gerätes zu einer bekannten Position beruht.

Die Sichtbarkeit eines WLANs ist ein Beispiel für die Nähe zu einem Access Point, da das Funksignal auf eine begrenzte Region rund um den Access Point beschränkt ist.

Ebenso ist die Sichtbarkeit eines Bluetooth-Low-Energy-Beacons auf eine bestimmte Region rund um den Beacon beschränkt, abhängig von der Sendeleistung.

Proximity kann keine Position in Form von Koordinaten liefern, aber es liefert eine Reihe von möglichen Positionen (Werner, 2014, p. 82).

2.4 Algorithmen zur Messung von Distanzen

Um eine Distanz zwischen einem Sender und einem Empfänger zu messen gibt es verschiedene Algorithmen.

2.4.1 Time-of-Arrival (TOA)

Das Prinzip von TOA basiert auf der Messung der absoluten Zeit, die ein Signal von einem Sender zu einem Empfänger benötigt. Dazu ist eine sehr präzise Synchronisation der Uhren von Sender und Empfänger notwendig, da schon ein Fehler von einer Nanosekunde in der Synchronisation einen Fehler in der Distanz von 30 cm verursacht wenn Funksignale verwendet werden (Strang, 2008, p. 41).

Prinzipiell ist TOA die genaueste Berechnung, allerdings ist die Implementierung komplex und die exakte Synchronisation setzt zusätzliche Hardware voraus.

2.4.2 Time-Difference-of-Arrival (TDOA)

Im Gegensatz zu TOA muss der Empfänger bei TDOA nicht die absolute Zeit wissen, wann das Signal übertragen wurde, es genügt die Zeitdifferenz der Ankunft des Signals von synchronisierten Sendern.

Der Vorteil ist, dass mögliche Abweichungen der Uhrzeit des Empfängers keine Rolle spielen, da konstante Zeitunterschiede durch Subtraktion eliminiert werden (Strang, 2008, p. 42).

2.4.3 Received-Signal-Strength (RSS)

Bei RSS basiert die Messung der Distanz auf der gemessenen Signalstärke, was nur bei Funksignalen möglich ist.

Um die Entfernung vom Sender zum Empfänger zu ermitteln, wird die Signalstärke gemessen und ausgewertet. Je näher der Empfänger am Sender ist, desto stärker ist das Signal (Strang, 2008, pp. 42-43).

2.5 Übersicht über Systeme zur Positionsbestimmung in Gebäuden

Um Indoor-Navigation realisieren zu können, gibt es verschiedene Technologien, die in Frage kommen.

2.5.1 Pseudoliten

Radiosignale von satelliten-basierten Navigationssystemen werden innerhalb von Gebäuden sehr stark gedämpft. Die empfangene Signalstärke ist oft zu gering, um von GPS Empfängern verarbeitet werden zu können.

Um Satelliten-Positionssysteme innerhalb von Gebäuden nutzen zu können, muss dieses Problem gelöst werden.

Eine Möglichkeit ist, hochsensible GPS Empfänger zu verwenden. Wenn die Sensibilität des Empfängers hoch genug ist, können Satellitensignale empfangen werden. Wenn aber mehrere Geschosse über einem Empfänger sind, können auch hoch empfindliche GPS-Empfänger kein Signal mehr verarbeiten.

Daher funktioniert das nur in eingeschößigen Gebäuden, zum Beispiel in Lagerhallen.

Eine andere Herangehensweise ist die Installation von Pseudoliten.

Pseudoliten emulieren ein Signal, das von mobilen Geräten empfangen wird, als ob es von einem Satelliten kommen würde. Pseudoliten haben eine hohe Genauigkeit in einem begrenzten Gebiet, wenn der Empfänger eine Sichtverbindung zum Sender hat.

Allerdings sind Pseudoliten sehr teuer und für komplexe Gebäude sind eine große Anzahl nötig, um immer eine Sichtverbindung zu den Empfängern zu haben (Mautz, 2012, pp. 79-82).

2.5.2 Kamera-basierte Systeme

Kamera-basierte Systeme versuchen, Positions- und Bewegungsinformationen aus Bildern zu generieren, analog zur visuellen Wahrnehmung des Menschen durch das Auge.

Grundsätzlich gibt es zwei mögliche Ansätze: Beim ersten befindet sich die Kamera am mobilen Gerät des Anwenders und bestimmt die Position durch den Blickpunkt des Endgerätes durch Scene Analysis. Das Problem, einen Standort aufgrund eines Kamerabildes zu ermitteln, ist aber eine große Herausforderung.

Beim zweiten Ansatz sind Kameras im Gebäude angebracht und die Bewegung einer Person oder eines Objektes werden extrahiert. Das Verfolgen einer Person oder eines Objektes ist leichter durchzuführen. Allerdings muss hierfür zuerst die Person oder das Objekt korrekt identifiziert werden (Werner, 2014, pp. 93-94).

Aufgrund der Tatsache, dass die Orientierung des Menschen hauptsächlich auf Basis der visuellen Information beruht, ist das ein vielversprechender Ansatz. Allerdings setzt der Vergleich mit der menschlichen Wahrnehmung eine Art Gedächtnis voraus, auf das zugegriffen werden kann um die aufgenommenen Bilder zu vergleichen und zuzuordnen. Außerdem erreicht ein Kamera-basiertes System zurzeit noch nicht die Genauigkeit des menschlichen Auges.

2.5.3 Audio-basierte Systeme

Audio-basierte Systeme verwenden die Ausbreitung von Schallwellen im Raum, um mobile Geräte zu lokalisieren.

Schallwellen erlauben es, verschiedene physikalische Effekte zu nutzen, um die Position eines mobilen Gerätes zu bestimmen.

Einfache audio-basierte Systeme verwenden Ultraschallwellen, die das menschliche Gehör nicht wahrnehmen kann, um die Position zu bestimmen.

Aufgrund der Ähnlichkeit heißt ein solches System *Active Bat system*. Es basiert auf einem Sensor-Netzwerk von Ultraschallmikrofonen und erfasst Ultraschallwellen, die von einem mobilen Gerät ausgesendet werden.

Die Ausbreitung von Schall innerhalb von Gebäuden ist sehr natürlich und oft besser als die Ausbreitung von Lichtsignalen. Viele Materialien reflektieren den Schall. So können verschiedene Orte, wie Räume oder Gänge, einfach mit derselben Schallsignatur gefüllt werden. Diese ist nur mehr minimal in benachbarten Räumen existent.

Aufgrund der relativ langsamen Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schallwellen (ca. 343m/s) ist es möglich, mittels wenigen installierten Mikrofonen den Winkel der Quelle eines Audiosignals sehr genau zu bestimmen.

Ein anderer Zugang ist, die typischen Umgebungsgeräusche von verschiedenen Räumen aufzunehmen und zu vergleichen. Dieser Ansatz ist der Fingerprint Methode eines WLAN-basierten Systems sehr ähnlich.

In jedem Raum wird ein Audiosignal für eine bestimmte Zeit aufgenommen und daraus ein Fingerprint errechnet, der für den jeweiligen Raum charakteristisch ist.

Das ist vor allem im industriellen Umfeld möglich, wo typische Raumklänge existieren (Werner, 2014, p. 97).

2.5.4 Funk-basierte Systeme

Die meisten Positionierungssysteme in Gebäuden basieren heute auf Funktechnologie.

Durch die weite Verbreitung von Funktechnologien ist die dafür benötigte Hardware relativ billig. Außerdem gibt es funkbasierte Infrastrukturen schon in sehr vielen Gebäuden.

Es gibt mehrere Möglichkeiten, eine Positionsbestimmung mittels Funksignalen durchzuführen.

Eine Möglichkeit ist die Information der Signalstärke, da die Signalstärke mit zunehmender Distanz vom Sender zum Empfänger schwächer wird.

Eine andere Möglichkeit ist die Position anhand einer exakten Zeitmessung zu bestimmen. Mit Ultraweitband-Signalen ist es möglich, sehr kurze Funkimpulse zu senden und zu empfangen, die eine sehr genaue Positionierung durch die Berechnung der Verzögerung des Signals zulassen.

Allerdings ist die Länge des Ausbreitungsweges des Signals in Gebäuden nicht immer ein exaktes Merkmal für die Distanz, da oft eine Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger gegeben sein muss, was in vielen Räumen und Geschoßen sehr viele Empfänger voraussetzt.

Eine dritte Möglichkeit basiert auf der Bestimmung von Winkeln.

Mit einer Anordnung von Antennen kann bestimmt werden, aus welchem Winkel das Funksignal gesendet wird (Werner, 2014, pp. 94-96).

Des Weiteren ist der Einsatz von WLAN eine Möglichkeit zur Positionsbestimmung.

Ein Beispiel dafür ist RADAR. Bei diesem System werden in einer Trainingsphase Signalstärken zusammen mit Orten gesammelt und in einer Datenbank gespeichert. Die Positionsbestimmung erfolgt dann durch den Vergleich der gemessenen Signalstärke mit den Einträgen in der Datenbank (Fingerprinting).

Der Vorteil von diesem System ist, dass die meistens vorhandene WLAN-Infrastruktur genutzt werden kann (Bahl & Padmanabhan, 2000).

2.6 Bluetooth

Bluetooth ist ein drahtloser Datenübertragungsstandard, der 1994 von Ericsson (Haartsen, 1998, p. 110) und in weiterer Folge von der „Bluetooth Special Interest Group (SIG)“ entwickelt wurde. Der Standard beschreibt die drahtlose Übertragung von Daten zwischen Geräten auf einer Frequenz von 2,4 GHz. Der Name leitet sich vom dänischen König Harald Blatland (auf Englisch Bluetooth) ab, der Teile von Norwegen und Dänemark vereinte. Heutzutage ist diese Technologie in unserem Alltag nicht mehr wegzudenken. Sie findet sich in Smartphones, Lautsprechern, Freisprechanlagen in Autos oder in Peripherie-Geräten von Computern, wie Tastatur oder Maus. Die Reichweite von Bluetooth beträgt, abhängig von der Sendeleistung, 1-100 Meter. Die

Datenübertragungsrate steigerte sich von 732,2 kbit/s in Version 1.0 auf 2,1 Mbit/s in Version 2.0 und auf bis zu 24 Mbit/s in Version 3.0 (allerdings nur in Verbindung mit einem zusätzlichen Highspeed-Kanal auf Basis von WLAN) (Bluetooth SIG, 2016). Der Energieverbrauch zur Datenübertragung war bis zur Bluetooth Version 3.0 allerdings relativ hoch. Damit verbunden waren geringe Akkulaufzeiten, die einen Einsatz, vor allem im mobilen Bereich, nicht immer sinnvoll machten.

2.6.1 Bluetooth-Low-Energy (BLE)

Erst mit der 2009 angekündigten und 2010/11 verfügbaren Version 4.0 wurde der Standard Bluetooth-Low-Energy (BLE) oder auch Bluetooth-Smart eingeführt. Dieser Standard ermöglicht es, die Funkübertragung sehr energiesparend zu gestalten.

Das wird dadurch erreicht, indem sich die BLE-Chips die meiste Zeit in einem Standby Modus befinden und nur in bestimmten Intervallen ein Signal senden. Während des Sendens ist der Strombedarf allerdings gleich hoch wie beim herkömmlichen Bluetooth (Hughes, 2014, p. 9).

Das Sendeintervall reicht von 7 Millisekunden bis 4 Sekunden.

In Abbildung 2 sieht man eine Übersicht über kabellose Datenübertragungstechnologien. Dargestellt werden einerseits die Datenrate und andererseits die Reichweite der Technologien.

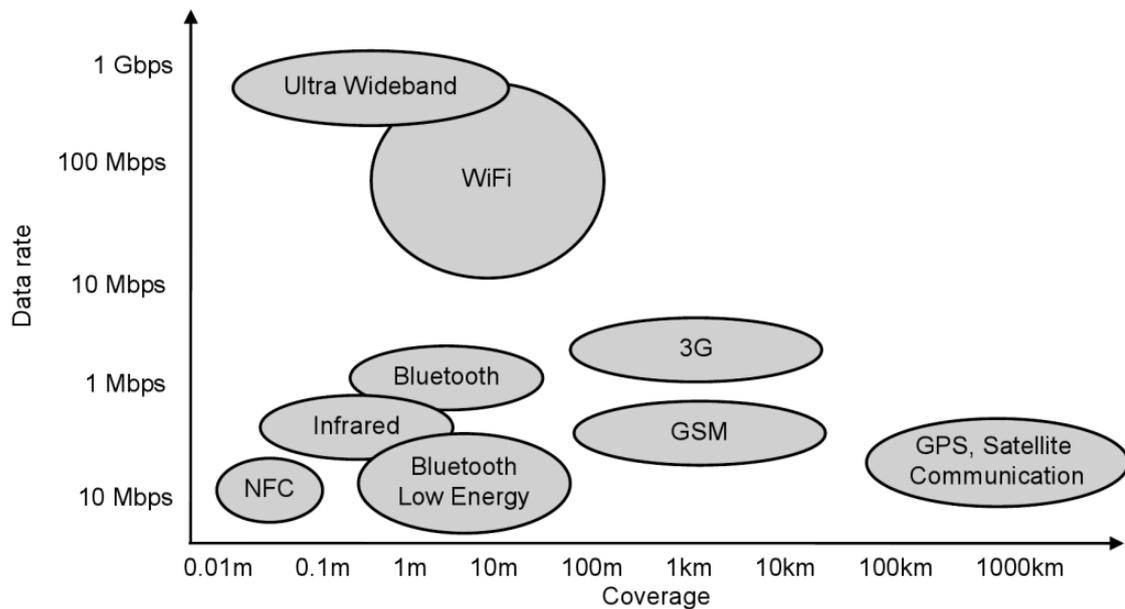


Abbildung 2 Datenrate und Reichweite kabelloser Datenübertragungstechnologien (Gupta, 2013, p. 3)

Bluetooth hat eine weitaus höhere Datenrate als BLE, allerdings verfügt BLE über eine leicht höhere Reichweite, obwohl der Energieverbrauch deutlich geringer ist. (Gupta, 2013, p. 3)

Durch die maximale Übertragungsrate von 1 Mb/s wird Bluetooth nicht als Standard zur Übertragung von größeren Datenmengen von BLE abgelöst werden.

Es gibt zwei Arten von Bluetooth-Low-Energy. Das sind zum einen single-mode und zum anderen dual-mode.

Geräte mit single-mode verwenden ausschließlich BLE und haben dadurch einen sehr niedrigen Strombedarf. Diese Geräte, wie zum Beispiel Beacons, besitzen Chips ohne komplizierte Funktionalitäten.

Dual-Mode Geräte besitzen einen klassischen Bluetooth Chip, der BLE integriert hat. Dazu zählen zum Beispiel Smartphones, Tablets, Computer (Deyhle, 2012, p. 4).

Das iPhone 4S war 2011 das erste Endgerät, das BLE unterstützte. Mittlerweile sind alle aktuellen Smartphones, Tablets, etc. BLE-fähig.

2.7 Beacons

2.7.1 iBeacon

iBeacon wurde von der Firma Apple im Jahr 2013 als Technologie vorgestellt; es handelt sich um ein Protokoll, das es mobilen Applikationen, die auf Smartphones, Tablets oder Wearables (vorausgesetzt das Gerät unterstützt Bluetooth Low Energy) laufen, erlaubt, zu bestimmen, wie nah sie an einem Bluetooth Low Energy Sender sind.

Diese Sender werden hardware Beacons oder einfach nur Beacons genannt.



Abbildung 3 Verschiedene Beacons

Sobald ein BLE-fähiges Gerät mit einer passenden Applikation in die Reichweite eines Beacons kommt und Bluetooth aktiviert ist, kann eine Push Nachricht angezeigt oder eine Positionsbestimmung durchgeführt werden.

Beacons senden in regelmäßigen Abständen drei hexadezimale Werte, mit denen die Beacons identifiziert werden können, und Informationen über die Sendeleistung (Maier, 2014).

Die hexadezimalen Werte sind:

Universally Unique Identifier (UUID):

Die UUID ist ein 16 Bytes großer Wert, der für die allgemeine Identifikation verwendet wird. Die UUID kann verwendet werden, um alle Beacons einer Firma oder einer Anwendung zuzuordnen (zum Beispiel alle Beacons eines Flughafens).

Major ID:

Der Major-Wert ist eine 2 Bytes große Zahl, die eine Unterteilung innerhalb einer UUID ermöglicht (zum Beispiel alle Beacons eines Terminals des Flughafens).

Minor ID:

Der Minor-Wert ist ebenfalls eine 2 Bytes große Zahl, um Beacons mit gleicher UUID und gleichem Major Wert zu identifizieren (zum Beispiel die einzelnen Gates der Terminals).

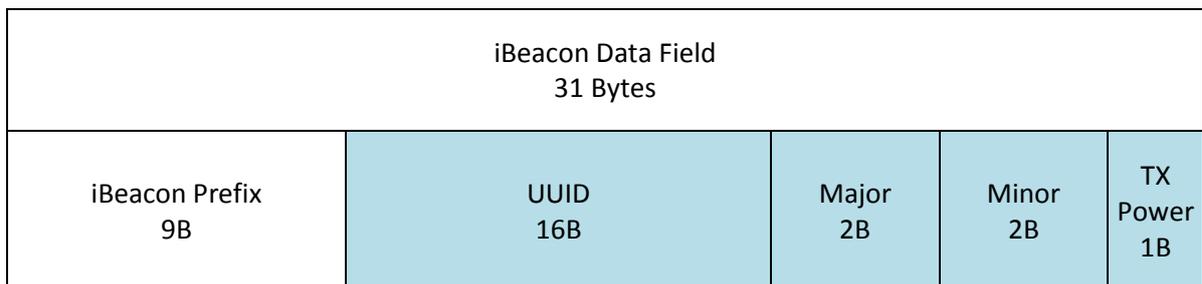


Abbildung 4 iBeacon data field

Mithilfe der übermittelten Sendeleistung kann eine Distanzmessung und in weiterer Folge eine Positionsbestimmung durchgeführt werden. Die Berechnung des Abstandes zwischen einem Endgerät und einem Beacon erfolgt über die empfangene Signalstärke (RSSI, Received-Signal-Strength-Indicator) und der Measured Power. Die Measured Power wird zusammen mit den drei Identifikationsnummern (UUID, Major, Minor) vom Beacon übertragen und kann vom Benutzer nicht verändert werden. Bei Apples iBeacons wird die Measured Power durch die gemessene RSSI bei einem Abstand von einem Meter festgelegt.

Mit der Einführung des Betriebssystems iOS 7 wurde eine neue Funktion zur Bestimmung der ungefähren Nähe von einem Beacon zu einem Empfangsgerät bereitgestellt: das „ranging“. Dabei handelt es sich um eine Einteilung der gemessenen Signalstärke eines Beacons in vier Zonen, die sogenannten „Proximity States“.

- Immediate
- Near
- Far
- Unknown

Die Zone „Immediate“ bedeutet, dass sich das Empfangsgerät sehr nahe am Beacon befindet. Die Distanz entspricht ungefähr 0 m bis 1 m.

Mit einer direkten Sichtverbindung zwischen Beacon und Empfangsgerät beträgt die Entfernung in der Zone „Near“ ungefähr 1 m bis 3 m. Falls sich aber Hindernisse dazwischen befinden, ist es möglich, dass der Zustand „Near“ nicht angezeigt wird obwohl der Beacon in Reichweite ist.

Die Zone „Far“ beschreibt ein Beacon, dessen Signal zwar empfangen wird, aber weder den Zonen „Immediate“ noch „Near“ zugeordnet werden kann. Es ist aber wichtig anzumerken, dass Beacons, die in der Zone „Far“ angezeigt werden, tatsächlich sehr wohl in der Nähe sein können, das empfangene Signal jedoch durch Störquellen beeinflusst wird.

„Unknown“ beschreibt den Zustand eines Beacon, dessen Nähe nicht bestimmt werden kann (Apple, 2014, p. 7).

2.7.2 Eddystone

Eddystone ist Googles Äquivalent von Apples iBeacon Protokoll.

Es ist ein offenes Protokoll, das einige Vorteile gegenüber iBeacon hat. Der wichtigste Vorteil ist, dass es eine open-source Lizenz hat.

Im Vergleich zu iBeacons, die nur die 3 Werte UUID, Major, Minor und die Sendeleistung senden, können Eddystone Beacons vier verschiedene Frametypen übertragen. Die vier verschiedenen Frametypen sind:

- Eddystone-UID
- Eddystone-URL
- Eddystone-TLM
- Eddystone-EID

Ein Eddystone Beacon kann ein, zwei, drei oder alle vier Frametypen gleichzeitig übertragen.

In Abbildung 5 sieht man das Datenfeld eines Eddystone Beacons.

Eddystone Data Field 31 Bytes									
Len 1B	Type 1B	Flags 1B	Len 1B	Type 1B	UUID 2B	Len 1B	Type 1B	UUID 2B	Eddystone Frames Up to 20B

Abbildung 5 Eddystone data field

Die ersten 11 Bytes sind dabei immer gleich und beinhalten außerdem die gleiche Information wie Apples iBeacon, mit dem Unterschied, dass die Daten anders formatiert sind. Die letzten bis zu 20 Bytes des Datenfeldes können variieren und derzeit vier verschiedene Datenframes beinhalten.

Eddystone-UID (App Beacon):

Der häufigste Typ ist das Eddystone UID beacon und entspricht in der Funktion Apples iBeacon. In Abbildung 6 sieht man den Eddystone UID Frame.

Eddystone UID Frame 20 Bytes				
Frame Type 1B	TX Power 1B	Namespace ID 10B	Instance ID 6B	RFU 2B

Abbildung 6 Eddystone UID frame

Das Feld Namespace ID entspricht dem Major Wert bei iBeacon, das Feld Instance ID dem Minor Wert. Das bedeutet, dass für jeden Namespace eine eigene Applikation notwendig ist.

Eddystone-URL (Browser Beacon):

Beim Frametyp Eddystone-URL beinhaltet der Frame eine URL. In der Abbildung 7 sieht man das Datenfeld des Eddystone URL Frames.

Eddystone URL Frame 6-20 Bytes			
Frame Type 1B	TX Power 1B	URL Scheme Prefix 1B	Encoded URL up to 17B

Abbildung 7 Eddystone URL frame

Das erste Feld, das bei allen drei Frametypen vorhanden ist, beinhaltet den Frametyp. Das zweite Feld gibt die Sendeleistung an. Dieser Wert ist, im Gegensatz zu Apples iBeacon, in

einer Distanz von 0 Metern kalibriert. Das Feld URL Scheme Prefix enthält das Präfix der URL (http://www., https://www. oder http://, https://). Im letzten Datenfeld ist die codierte URL (Unique Resource Identifier) gespeichert.

Sobald ein Empfangsgerät mit aktiviertem Bluetooth und entsprechender App in die Nähe eines Beacons mit Eddystone URL kommt, wird die gespeicherte URL aufgerufen und am Empfangsgerät angezeigt.

Eddystone-TLM:

Das dritte Paketformat wird Eddystone TLM genannt. TLM steht hier für telemetry. Hier werden Telemetrie Daten vom beacon gesendet. Die gesendeten Telemetrie Daten sind:

- Batterie Spannung in mV
- Beacon Temperatur in °C
- Anzahl der gesendeten Advertising Frames seit der Inbetriebnahme oder eines Reboots
- Zeit seit der Inbetriebnahme oder dem letzten Reboot in Zehntelsekunden
-

Da dieses Paket keine ID enthält, muss es mit einem anderen Frame gepaart sein, das diese Information beinhaltet (URL oder UID).

Eddystone TLM Frame 14 Bytes					
Frame Type 1B	Version 1B	Battery Voltage (mV) 2B	Beacon Temperature 2B	Advertisement PDU count since boot 4B	Time Since Boot (milliseconds) 4B

Abbildung 8 Eddystone TLM frame

Eddystone EID:

Im April 2016 hat Google Eddystone EID angekündigt. Dabei handelt es sich um ein viertes Frame, das Eddystone Beacons unterstützen. EID steht für Ephemeral ID, das übersetzt eine flüchtige ID bedeutet. Es handelt sich um eine verschlüsselte ID, die sich nach erfolgter Registrierung bei einem Web-Service, innerhalb einer festgelegten Rate periodisch ändert.

Die übertragene flüchtige ID kann von dem Service, mit dem die ID registriert wurde, aufgelöst werden. Für andere Empfänger scheint es, als ob sich die ID zufällig ändern würde.

Dieser Frametyp ist geeignet für Anwendungen, bei denen der Betreiber der Beacons möchte, dass nur eine bestimmte Gruppe von Personen die Beacons nutzen kann (Google, 2016).

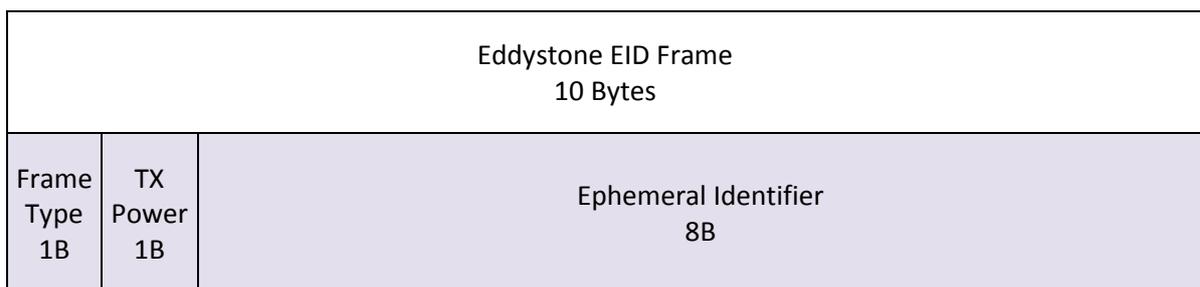


Abbildung 9 Eddystone EID Frame

3 Test der Beacons auf die Genauigkeit der Positionsbestimmung

3.1 Übersicht über Beacon Anbieter

Es gibt mittlerweile eine große Anzahl an Firmen, die Beacons anbieten. Im folgenden Kapitel stelle ich drei Anbieter von Beacons vor, die schon seit einigen Jahren Beacons entwickeln und anbieten.

Folgende Firmen stelle ich kurz vor:

- Estimote, Inc.
- Beaconinside GmbH
- blukii Beacons, Schneider Schreibgeräte GmbH

3.1.1 Estimote Beacons

Die Firma Estimote ist ein Technology Start-Up und wurde im Jahr 2012 in Polen gegründet.

Der Schwerpunkt der Firma liegt auf ortsbasierten Diensten in Gebäuden. Zurzeit liegt ihr Hauptaugenmerk auf Kaufhäusern, die ihre Waren nur sekundär oder gar nicht im Internet vertreiben.

Mittlerweile gibt es Firmenstandorte in Krakau, San Francisco und New York.

Die Firma bietet die Hardware, also Beacons, und ein dazugehöriges SDK (Software Development Kit) an, um eigene Applikationen entwickeln zu können.

Estimote Beacons sind kleine Computer mit einem 32-bit ARM® Cortex M0 Prozessor und einem Bluetooth-Low-Energy-Chip.

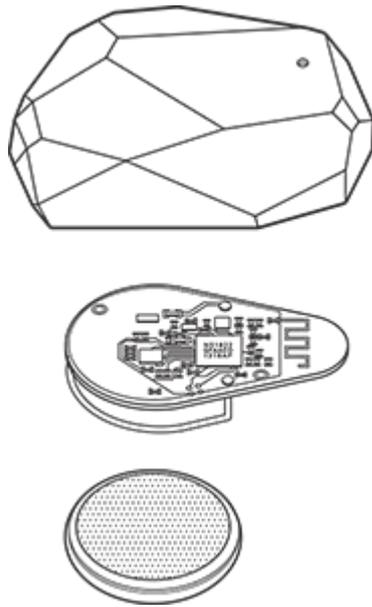


Abbildung 10 Aufbau eines Estimote Beacons (Estimote, 2014)

Aufgrund des sehr sparsamen BLE-Chips beträgt die Betriebsdauer mit einer Knopfatterie mehrere Jahre. Die Betriebsdauer des Beacons ist aber stark von den Einstellungen des Sendeintervalls und der Sendeleistung abhängig.

Diese können vom Benutzer angepasst werden. Das Sendeintervall kann von 100 ms bis 2000 ms eingestellt werden. Die Sendeleistung reicht von -30 dBm bis 4 dBm. Laut der Firma Estimote beeinflussen das Sendeintervall und die Sendeleistung die Genauigkeit der Positionsbestimmung der Beacons. Die Genauigkeit werde ich in weiterer Folge durch Tests analysieren.

Zur Konfiguration der Beacons bietet die Firma eine App an, mit der sich die veränderbaren Parameter einstellen und Informationen zu den Beacons wie Batterielebensdauer, Temperatur, UUID, Minor Wert und Major Wert anzeigen lassen.

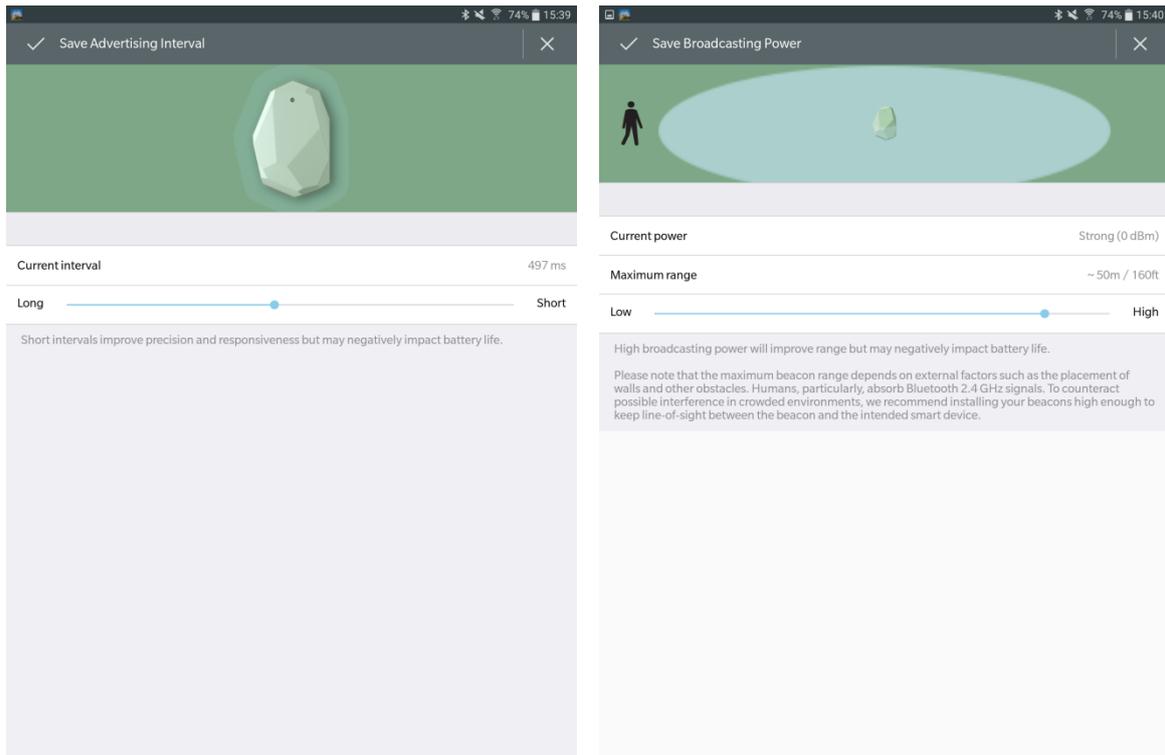


Abbildung 11 User Interface zur Konfiguration von Sendeintervall und Sendeleistung

Derzeit werden vier verschiedene Arten von Beacons angeboten:

- Proximity Beacons
- Long Range Location Beacons
- Estimote Stickers
- Estimote Mirror

Proximity Beacons:

Das sind die am weit verbreitetsten Beacons von Estimote. Die Batterielebensdauer beträgt bei Werkseinstellungen 2 Jahre. Neben dem BLE-Chip hat dieser Beacon auch einen Beschleunigungs- und einen Temperatursensor. Die Beacons haben eine Reichweite von ca. 70 Metern. Allerdings wird das Signal durch verschiedene Dinge zwischen Sender und Empfänger beeinflusst (Wände, Menschen, Möbel, etc.). Dadurch beträgt die maximale Reichweite unter realen Bedingungen 40-50 Meter.

Proximity Beacons haben eine Größe von 52 mm x 35 mm x 17 mm.

Derzeit bietet die Firma ein Paket von 3 Proximity Beacons um 59 US\$ an.



Abbildung 12 Estimote Proximity Beacons (Estimote, 2012-2016)

Long Range Location Beacons:

Diese Beacons bietet die oben genannte Firma seit Februar 2016 an. Sie sind größer als die Proximity Beacons, haben aber auch eine größere maximale Reichweite von 200 Metern und eine längere Batterielebensdauer von 7 Jahren bei Werkseinstellungen. Zusätzlich zum Beschleunigungs- und Temperatursensor haben diese Beacons auch einen Licht- und Drucksensor und einen Sensor, um die magnetische Feldstärke zu messen. Das 3er Paket kostet 99 US\$.



Abbildung 13 Estimote Location Beacons (Estimote, 2012-2016)

Estimote Stickers:

Neben Beacons werden auch sogenannte Estimote Stickers angeboten. Diese Sticker haben eine geringere Reichweite von ca. 7 Metern und auch eine geringere Batterielebensdauer von einem Jahr, können aber einfach auf Objekte geklebt werden, um diese dann lokalisieren zu können, beziehungsweise um Infos über das Objekt auf einem Smartphone oder Tablet anzuzeigen.

Die Möglichkeit der Lokalisierung ist jedoch auf die drei Zonen immediate, near und far beschränkt.

Ein Paket mit 10 Stickern kostet zurzeit 99 US\$.



Abbildung 14 Estimote Sticker (Estimote, 2012-2016)

Estimote Mirror:

Diese Art von Beacons wurde im September 2016 von Estimote angekündigt. Es handelt sich um Beacons, die mittels eines HDMI- und eines USB-Anschlusses an ein handelsübliches Smart-TV-Gerät angeschlossen werden können. Der Estimote Mirror empfängt BLE Signale von Apps oder Estimote Stickers um passende Inhalte am Bildschirm anzuzeigen. Die Reichweite beträgt 10 Meter.

Ein Testpaket mit 3 Mirrors wird bereits 99 US\$ angeboten (Estimote, 2012-2016).



Abbildung 15 Estimote Mirror (Estimote, 2012-2016)

3.1.2 Beaconinside

Beaconinside wurde 2013 in Berlin gegründet. Das Unternehmen bietet Beacons und die dazugehörigen SDKs (Software Development Kits) sowohl für Apples iOS als auch für Googles Android an. Außerdem bietet die Firma umfassende Lösungen im Bereich der Indoor-Navigation an. Die Beacons unterstützen sowohl Apples iBeacon als auch Googles Eddystone.



Abbildung 16 Beaconinside Beacon

Die Beacons haben einen 32 bit ARM® Cortex-M3 Prozessor und einen Bluetooth Low Energy Chip. Das Sendeintervall ist von 50 ms bis 10 s und die Sendeleistung von -21 dBm

bis +5 dBm konfigurierbar. Die maximale Reichweite beträgt bei einer Sendeleistung von +5 dBm 80 m. Die Energieversorgung erfolgt entweder über 2 AA Mignon Batterien oder über einen 5 V USB-Micro Anschluss. Der Beacon hat eine Größe von 79 mm x 79 mm x 21 mm. Derzeit bietet die Firma ein Development Kit mit 3 Beacons um 89 € an (Beaconinside GmbH, 2016).

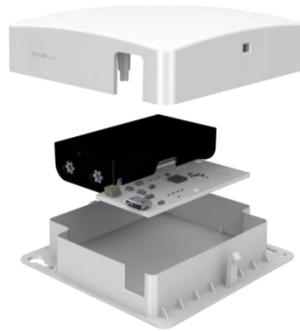


Abbildung 17 Aufbau eine Beaconinside Beacons

3.1.3 blukii Beacons

blukii Beacons werden vom Unternehmen Schneider Schreibgeräte GmbH, deren Firmensitz sich in Schramberg in Deutschland befindet, produziert und vertrieben. Die Firma gründete 2010 den neuen Bereich C. Schneider - New Solutions, in dem die blukii Beacons entwickelt wurden.

blukii Beacons gibt es in verschiedenen Ausführungen und Größen.



Abbildung 18 blukii Beacon H, L und S

blukii Beacon H:

Dieser Beacon hat die Form eines Leuchtturms, angelehnt an die Bedeutung von Beacon, und wird von einer Batterie mit 1350 mAh versorgt, die eine Lebensdauer, abhängig vom Sendintervall und der Sendeleistung von 60 bis 6000 Tagen hat. Zusätzlich zum Bluetooth Low Energy Chip hat der Beacon einen Beschleunigungs- und einen Temperatursensor. Die maximale Reichweite beträgt ca. 20 m. Der Beacon hat einen Durchmesser von 24 mm und eine Höhe von 39 mm.

Derzeit wird dieser Beacon um 29,90 € angeboten.

blukii Beacon L:

Der blukii Beacon L hat einen Durchmesser von 32 mm und eine Höhe von 9 mm. Die Knopf-Batterie mit 500 mAh versorgt den Beacon 25 bis 2500 Tage lang. Gleich wie der blukii Beacon H hat er auch einen Beschleunigungs- und Temperatursensor integriert. Die maximale Reichweite beträgt ca. 50 m.

Dieser Beacon kostet derzeit 58,99 €.

blukii Beacon S:

Der kleinste blukii Beacon hat nur einen Durchmesser von 22 mm und eine Höhe von 7 mm und ist mit einer Knopf-Batterie mit 220 mAh ausgestattet. Die Batterie-Lebensdauer beträgt 10 bis 1000 Tage. Trotz dieser minimalen Größe hat auch dieser Beacon einen Beschleunigungs- und einen Temperatursensor. Die maximale Reichweite beträgt auch hier ca. 20 m.

Dieser Beacon kostet derzeit 28,99 €.

(Schneider Schreibgeräte GmbH, 2016)

3.1.4 Auswahl des Anbieters

Ich habe mich für Proximity Beacons der Firma Estimote entschieden. Die Gründe dafür waren zum einen das Preis-Leistungsverhältnis, da die Firma 3er Sets von Proximity Beacons, sogenannte Developer Kits, zum Preis von 59 US\$ anbietet, die mit einer dazugehörigen App sehr einfach konfiguriert werden können und zum anderen bietet die

Firma ein sehr gutes SDK und gut verständliche Tutorials und Templates zur App Programmierung an, sowohl für Apples iOS als auch für Googles Android Betriebssystem. Im Vergleich zu den Location Beacons ist die Reichweite der Proximity Beacons von 70 Metern und die Ausstattung für die Anforderungen dieser Masterarbeit ausreichend. Ein weiteres Kriterium für mich war die Größe der Estimote Beacons, da diese im Vergleich zu den Beacons der Firma Beaconinside kleiner sind, und somit die Platzierung der Beacons erleichtert.

3.2 Testsoftware zur Positionsbestimmung

Zur Messung der Signalstärke bzw. der Entfernung zu den Beacons habe ich eine App für Android Betriebssysteme geschrieben.

Ich habe die App für Versionen ab Android 5.0.1 in Android Studio entwickelt.

Die Firma Estimote bietet ein SDK (Software Development Kit) für die Programmierung an, das ich verwendet habe, um die Verbindung vom Tablet mit den Beacons herzustellen. Dazu gibt es auch gute Tutorials auf der Homepage der Firma.

Im Forum der Webseite findet man auch Fragen zu vielen Problemen, die kompetent durch die Mitarbeiter beantwortet werden.

Die App scannt die Umgebung mittels Bluetooth und gibt eine Liste von Beacons in Reichweite mit folgenden Parametern aus:

- Major: die Major ID des Beacons
- Minor: die Minor ID des Beacons.
- Distance: die errechnete Distanz aus der empfangenen Signalstärke in Metern.
- Received-Signal-Strength-Indicator (RSSI): gemessene Signalstärke am Endgerät.
- Measured power: eine fix definierte Sendeleistung, die angibt, wie hoch die Signalstärke in einer Entfernung von einem Meter ist.

RSSI_beacon

Distanz, Received Signal Strength Indicator, Measured Power von Beacons in Reichweite

beacon major 46489 minor 39217
distance: 1,42m; RSSI: -63; measured power: -60

beacon major 20747 minor 17416
distance: 1,56m; RSSI: -66; measured power: -62

beacon major 6395 minor 54131
distance: 1,85m; RSSI: -81; measured power: -74

Abbildung 19 Screenshot der App

3.2.1 Code der App zur Messung der Entfernung

Klasse MainActivity

Methode onCreate (Methode, die beim Aufrufen der App ausgeführt wird)

```
protected void onCreate(Bundle savedInstanceState) {
    super.onCreate(savedInstanceState);
    setContentView(R.layout.activity_main);
    listView = (ListView) findViewById(R.id.listView1);

    //erstellen eines BeaconManagers um mit Beacons zu interagieren
    beaconManager = new BeaconManager(this);
    //erstellen einer Region, in diesem Fall mit der UUID der Estimote
    Beacons
    region = new Region("ranges region", UUID.fromString("B9407F30-F5F8-
466E-AFF9-25556B57FE6D"), null, null);

    //setzen eines Ranging Listeners, der alle Beacons der definierten
    Regionn Reichweite in eine Liste hinzufügt
    beaconManager.setRangingListener(new BeaconManager.RangingListener()
    {
        @Override
        public void onBeaconsDiscovered(Region region, List<Beacon> list)
        {
            if (!list.isEmpty()) {
                Beacon nearestBeacon = list.get(0);
                stringList = new ArrayList<String>();
                adapter = new ArrayAdapter<String>(MainActivity.this,
android.R.layout.simple_list_item_1, android.R.id.text1, stringList);

                //Auslesen und Anzeigen der Werte der Beacons in der
    Liste
                for (Beacon rangedBeacon: list) {

                    int major = rangedBeacon.getMajor();
                    int minor = rangedBeacon.getMinor();
                    int rssi = rangedBeacon.getRssi();
                    int txPower = rangedBeacon.getMeasuredPower();
                    double distance = computeAccuracy(rangedBeacon);
                    adapter.add(String.format("beacon major %d minor
%d \ndistance: %.2fm; RSSI: %d; measured power: %d",
                    major, minor, distance, rssi, txPower));
                    listView.setAdapter(adapter);
                });
            }
        }
    });
}
```

Methode onResume (wird ausgeführt, sobald die App wieder am Bildschirm sichtbar ist)

```
//Startet das Ranging sobald die Aktivität am Bildschirm sichtbar ist
@Override
protected void onResume () {
    super.onResume ();
    SystemRequirementsChecker.checkWithDefaultDialogs(this);
    beaconManager.connect(new BeaconManager.ServiceReadyCallback () {
        @Override
        public void onServiceReady () {
            beaconManager.startRanging(region);
        }
    });
}
```

Methode onPause (wird ausgeführt, sobald die App in den Hintergrund geschaltet wird)

```
//Stoppt das Ranging sobald die Aktivität am Bildschirm nicht mehr
sichtbar ist
@Override
protected void onPause () {
    beaconManager.stopRanging(region);
    super.onPause ();
}
```

3.3 Distanzmessung

Um die Genauigkeit der Beacons zu ermitteln, werden verschiedene Messungen mit der Android App auf einem Samsung Galaxy Tab S2 mit Android 6.0.1 durchgeführt. Das Ziel dieser Messungen soll sein, die Genauigkeit der Entfernungsbestimmung zwischen den Sendern (Beacons) und dem Empfänger (Tablet) zu ermitteln, um dann daraus die verschiedenen Möglichkeiten für den Einsatz der Beacons zu diskutieren.

Zusätzlich zu den einzelnen Messwerten werden auch der Mittelwert und der Median der gemessenen Werte ermittelt. Der Mittelwert berechnet sich durch Addition der Messwerte dividiert durch die Anzahl der Messungen. Im Gegensatz dazu entspricht der Median dem mittleren Wert in einer Zahlenreihe. Bei einer ungeraden Anzahl der Werte entspricht die Zahl, die sich genau in der Mitte der Zahlenreihe befindet, dem Median. Bei einer geraden Anzahl der Werte, wird der Median durch den Mittelwert der zwei in der Mitte liegenden Zahlen berechnet. Im Vergleich zum Mittelwert fallen beim Median Ausreißer weniger ins Gewicht.

Ich habe zwei unterschiedliche Sendeintervalle und drei unterschiedliche Sendeleistungen der Beacons für die Messungen gewählt. Die Sendeintervalle betragen einmal 500 ms und einmal 1000 ms.

Die Sendeleistungen betragen -12 dBm, 0 dBm und 4 dBm.

Gemäß den Angaben des Herstellers ist die Genauigkeit der Beacons höher, je geringer das Sendeintervall und je höher die Sendeleistung ist. Beide Parameter haben allerdings einen großen Einfluss auf die Batterielebensdauer der Beacons. Bei den Messungen soll überprüft werden, inwieweit die Genauigkeit der Distanzmessung tatsächlich von diesen Parametern abhängt und wie signifikant die Unterschiede sind.

Die Beacons sind in einem Raum in einer Höhe von 25 cm, 100 cm und 200 cm an einer Wand angebracht. Daraus soll dann abgeleitet werden, ob es einen Unterschied macht, in welcher Höhe die Beacons angebracht sind, und wenn dies zutrifft, in welcher Höhe die genauesten Ergebnisse gemessen werden.

In der ersten Versuchsreihe beträgt die Entfernung der Beacons zum Empfangsgerät 3 Meter und in der zweiten Versuchsreihe beträgt die Entfernung 6 Meter. Die Distanzen wurden aus dem Grund so gewählt, da die Anforderungen an Indoor-Positioning-Services mit einer Distanz von 6 Metern abgedeckt sind. Die Messdauer jeder Versuchsreihe beträgt 10 Sekunden.

Es wird davon ausgegangen, dass der Anwender bei der Positionsbestimmung das Gerät in der Hand hält, daher befindet sich das Endgerät in 110 cm Höhe.

3.3.1 Messung ohne Störquellen

Bei der Messung ohne Störquellen befinden sich Sender und Empfänger in direkter Linie zueinander ohne Hindernisse dazwischen, einmal in 3 Meter und einmal in 6 Meter Entfernung.

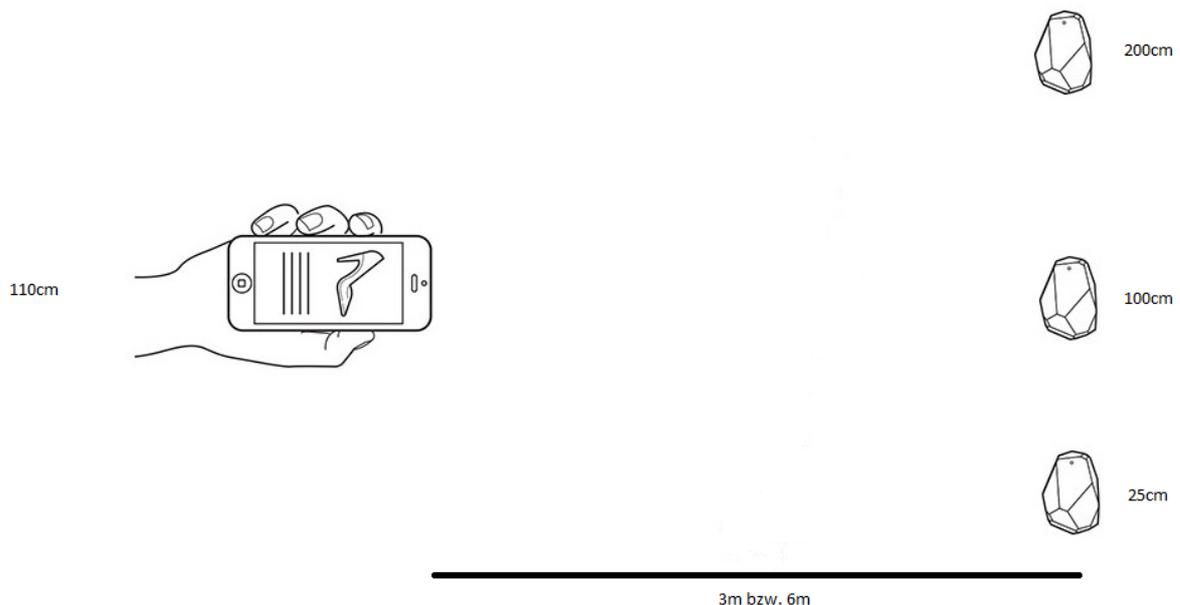
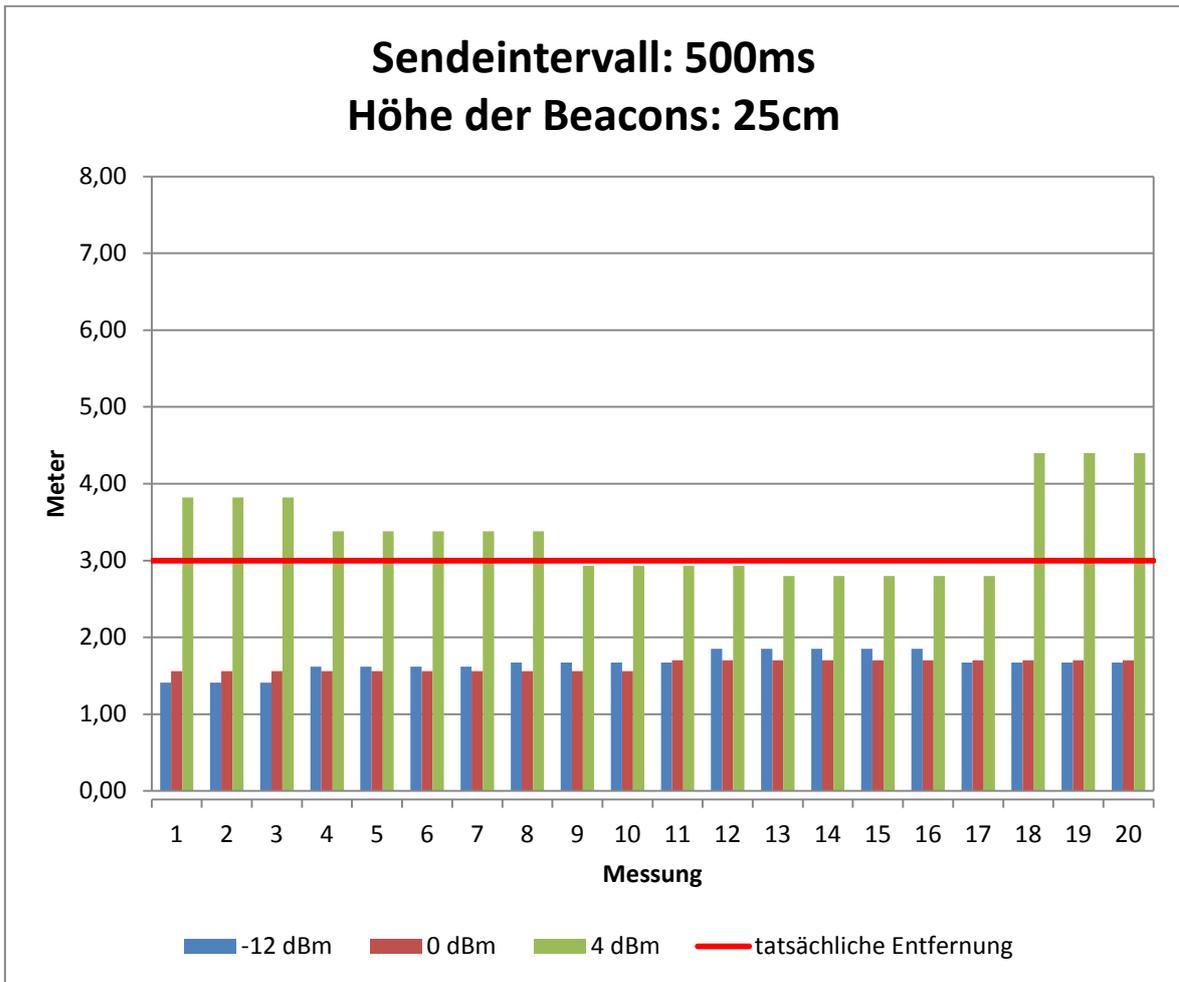
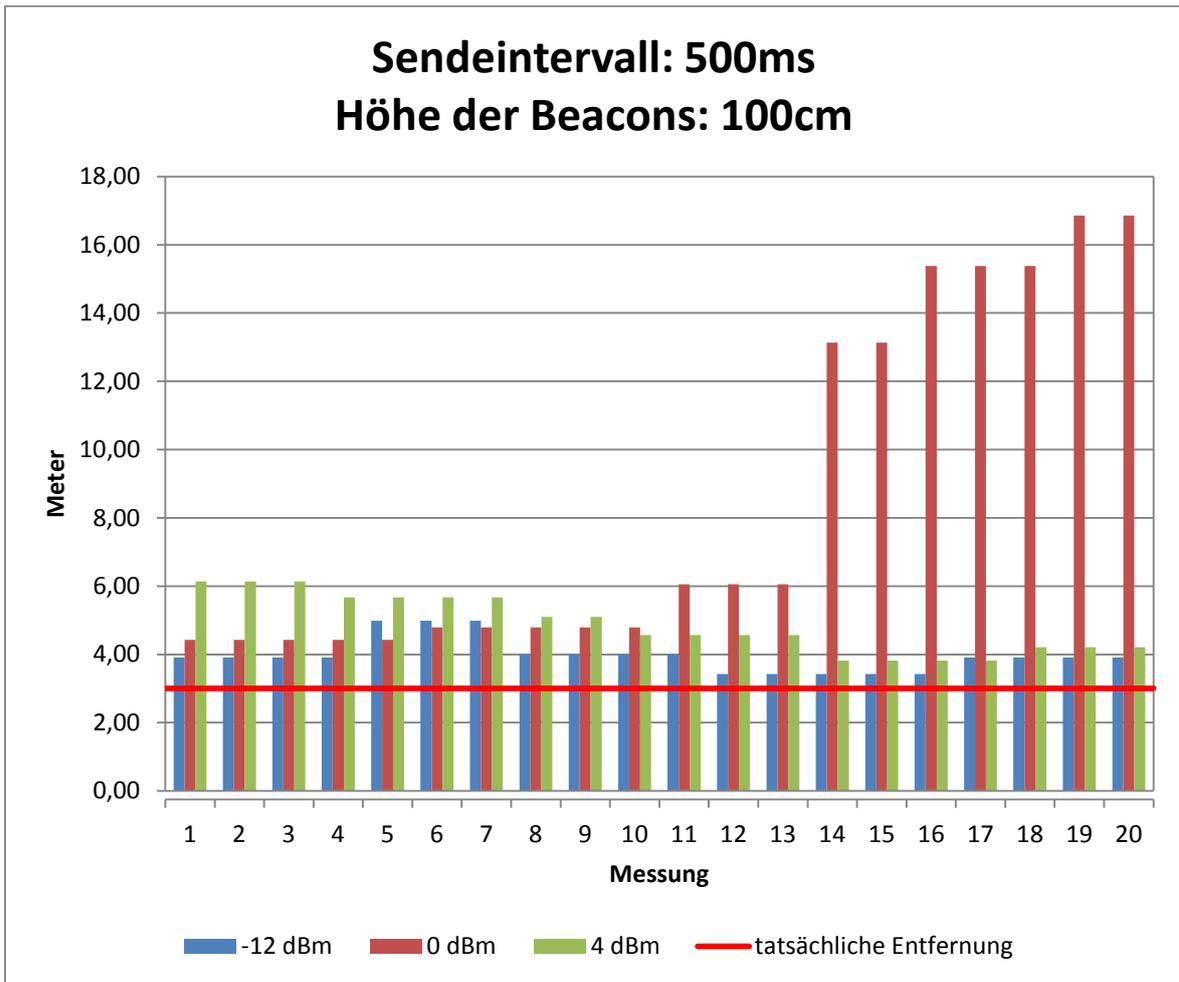


Abbildung 20 Skizze des Versuchsaufbaus ohne Störquellen (Estimote, 2014)



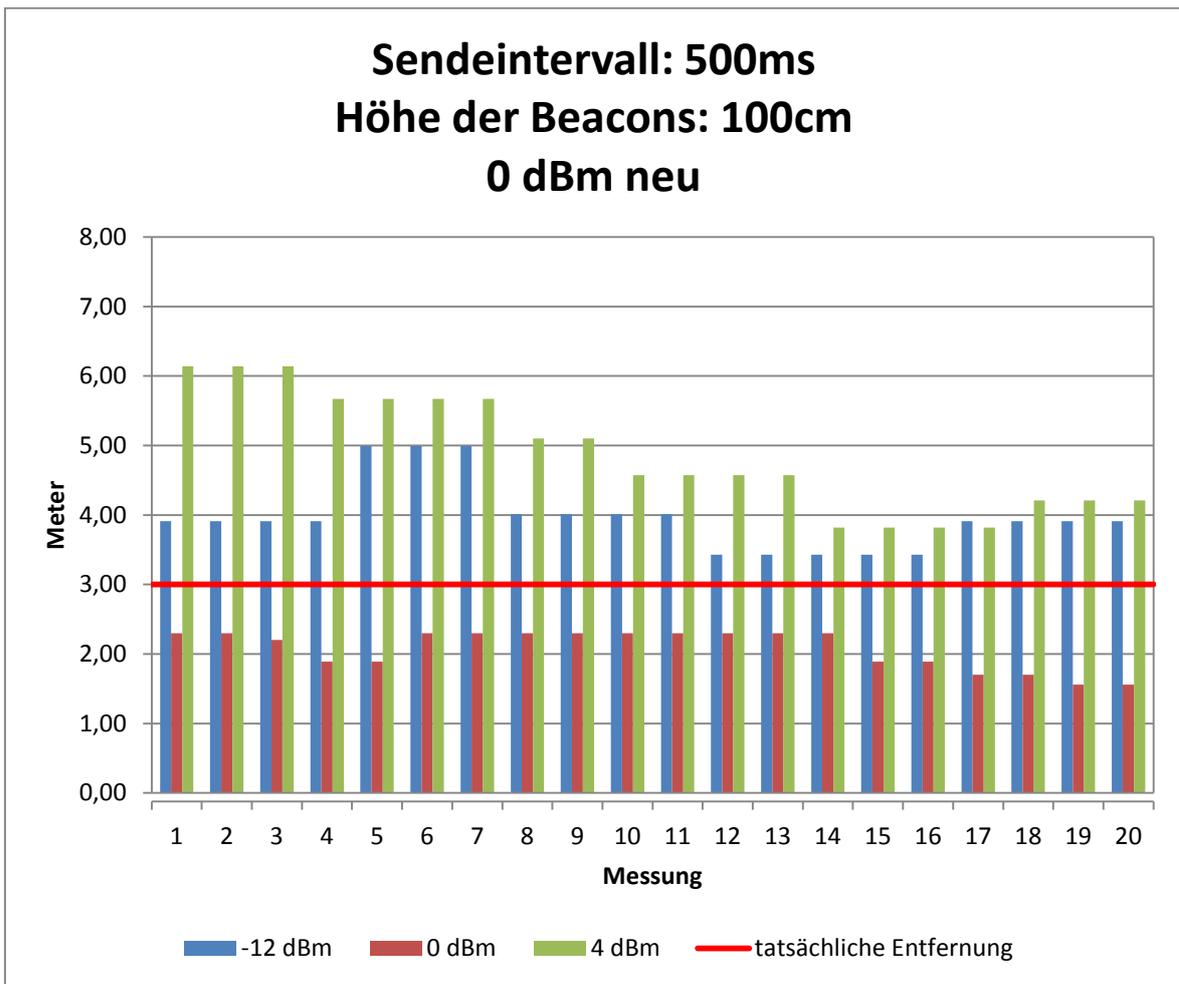
Sendeleistung	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
Mittelwert	1,67 m	1,63 m	3,36 m
Abweichung Mittelwert	-1,33 m	-1,37 m	0,36 m
Median	1,67 m	1,63 m	3,38 m
Abweichung Median	-1,33 m	-1,37 m	0,38 m

Das genaueste Ergebnis lieferte der Beacon mit einer Sendeleistung von 4 dBm.
Die Schwankungsbreite des Medians zwischen den Beacons lag bei 1,75 m.



Sendeleistung	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
Mittelwert	3,97 m	8,52 m	4,87 m
Abweichung Mittelwert	0,97 m	5,52 m	1,87 m
Median	3,91 m	5,42 m	4,57 m
Abweichung Median	0,91 m	2,42 m	1,57 m

Bei dieser Messung gab es beim Beacon mit 0 dBm Sendeleistung einige Ausreißer nach oben. Um zu überprüfen, ob es sich um einen Messfehler handelte oder ob die Ausreißer reproduzierbar waren, führte ich die Messung noch einmal durch.

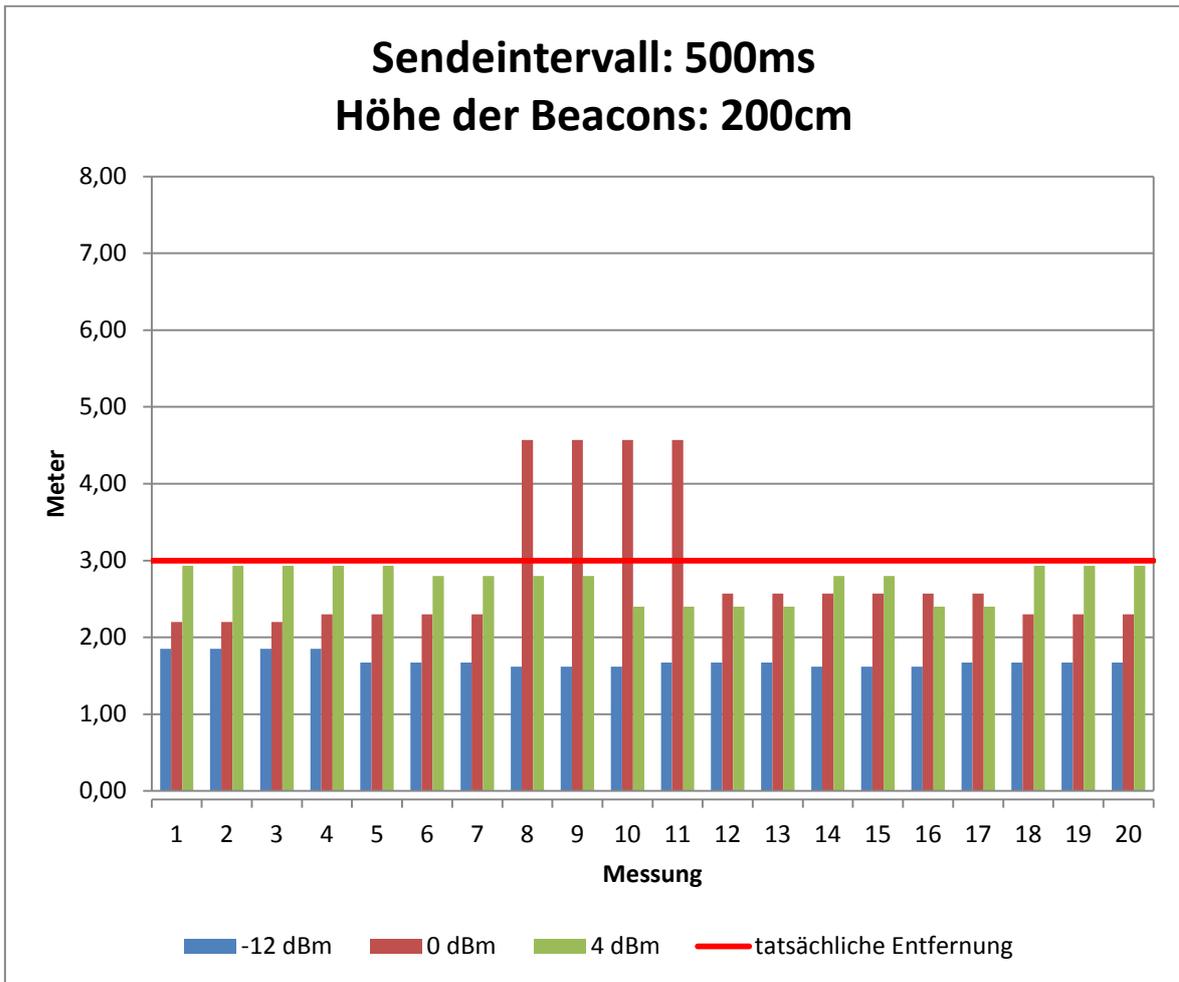


Sendeleistung	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
Mittelwert	3,97 m	2,08 m	4,87 m
Abweichung Mittelwert	0,97 m	-0,92 m	1,87 m
Median	3,91 m	2,30 m	4,57 m
Abweichung Median	0,91 m	-0,70 m	1,57 m

Bei der zweiten Messung gab es die Ausreißer nicht mehr. Daher ist von einem nicht reproduzierbaren Messfehler auszugehen.

Das genaueste Ergebnis lieferte der Beacon mit einer Sendeleistung von 0 dBm.

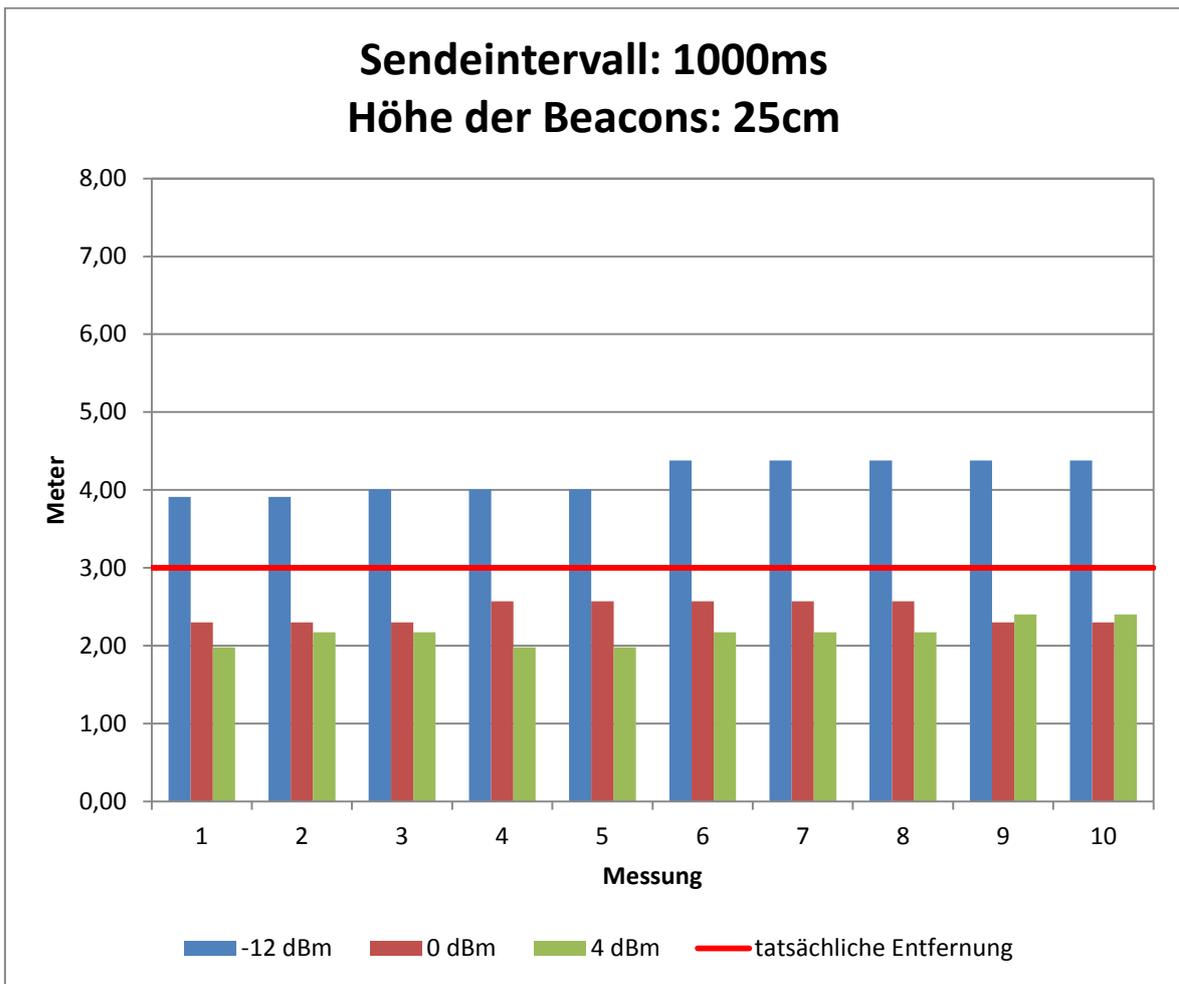
Die Schwankungsbreite des Medians zwischen den Beacons lag bei 2,27 m.



Sendeleistung	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
Mittelwert	1,69 m	2,82 m	2,73 m
Abweichung Mittelwert	-1,31 m	-0,18 m	-0,27 m
Median	1,67 m	2,44 m	2,80 m
Abweichung Median	-1,33 m	-0,57 m	-0,20 m

Das genaueste Ergebnis lieferte der Beacon mit einer Sendeleistung von 4 dBm.

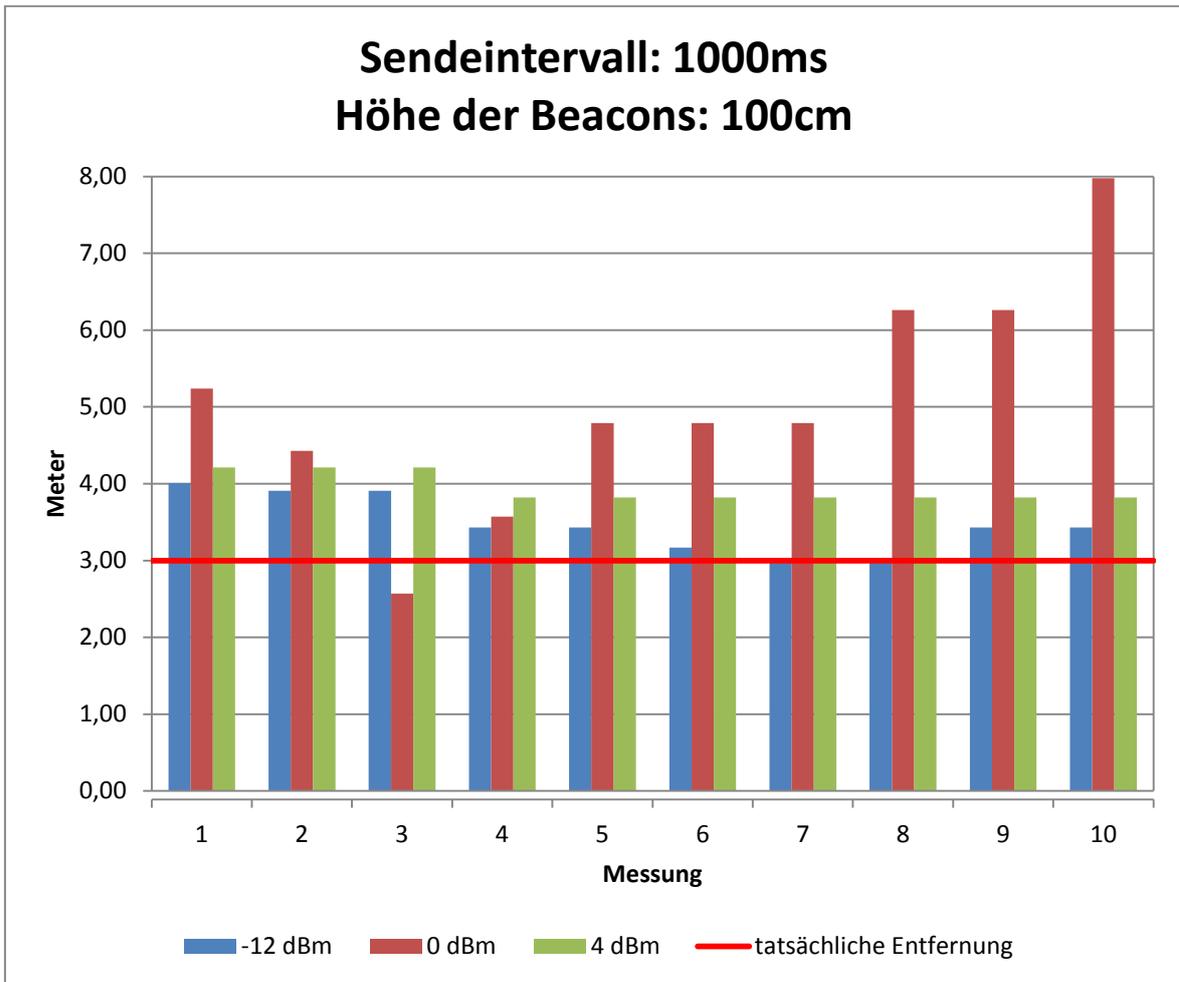
Die Schwankungsbreite des Medians zwischen den Beacons lag bei 1,13 m.



Sendeleistung	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
Mittelwert	4,18 m	2,44 m	2,16 m
Abweichung Mittelwert	1,18 m	-0,57 m	-0,84 m
Median	4,20 m	2,44 m	2,17 m
Abweichung Median	1,20 m	-0,57 m	-0,83 m

Das genaueste Ergebnis lieferte der Beacon mit einer Sendeleistung von 0 dBm.

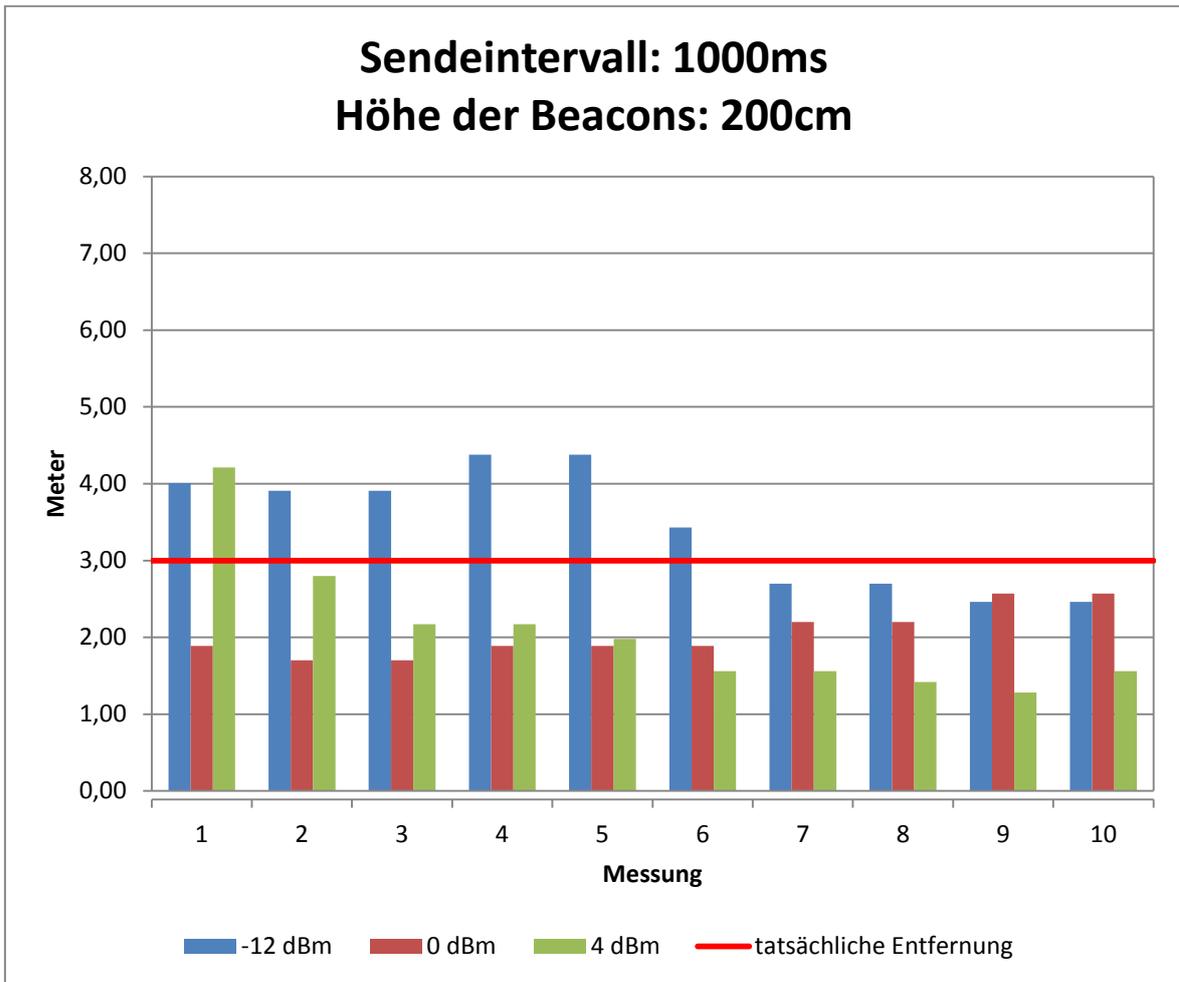
Die Schwankungsbreite des Medians zwischen den Beacons lag bei 1,77 m.



Sendeleistung	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
Mittelwert	3,47 m	5,07 m	3,94 m
Abweichung Mittelwert	0,47 m	2,07 m	0,94 m
Median	3,43 m	4,79 m	3,82 m
Abweichung Median	0,43 m	1,79 m	0,82 m

Das genaueste Ergebnis lieferte der Beacon mit einer Sendeleistung von -12 dBm.

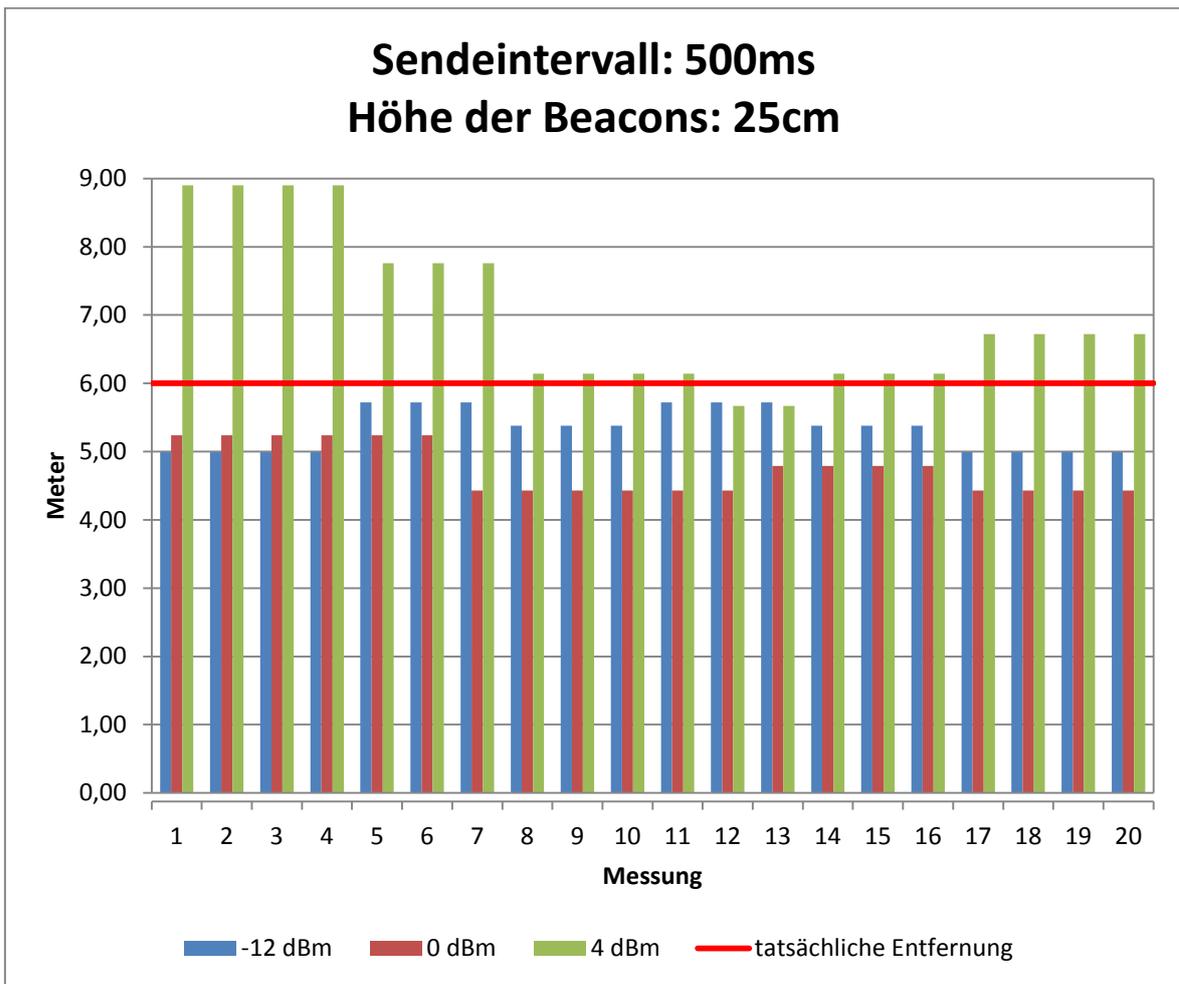
Die Schwankungsbreite des Medians zwischen den Beacons lag bei 1,36 m.



Sendeleistung	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
Mittelwert	3,43 m	2,05 m	2,07 m
Abweichung Mittelwert	0,43 m	-0,95 m	-0,93 m
Median	3,67 m	1,89 m	1,77 m
Abweichung Median	0,67 m	-1,11 m	-1,23 m

Das genaueste Ergebnis lieferte der Beacon mit einer Sendeleistung von -12 dBm.

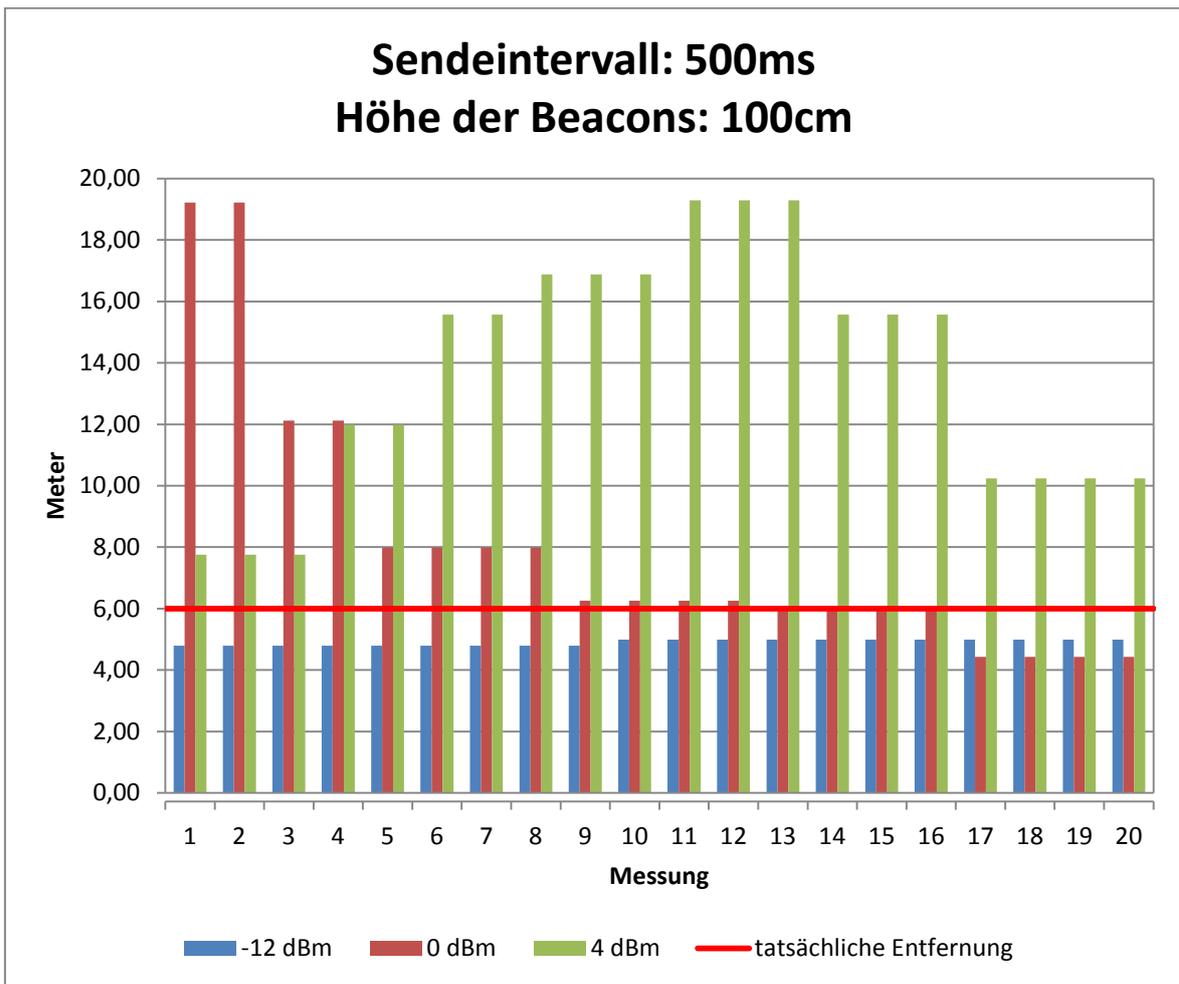
Die Schwankungsbreite des Medians zwischen den Beacons lag bei 1,9 m.



Sendeleistung	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
Mittelwert	5,33 m	4,75 m	7,00 m
Abweichung Mittelwert	-0,67 m	-1,26 m	1,00 m
Median	5,38 m	4,61 m	6,72 m
Abweichung Median	-0,62 m	-1,39 m	0,72 m

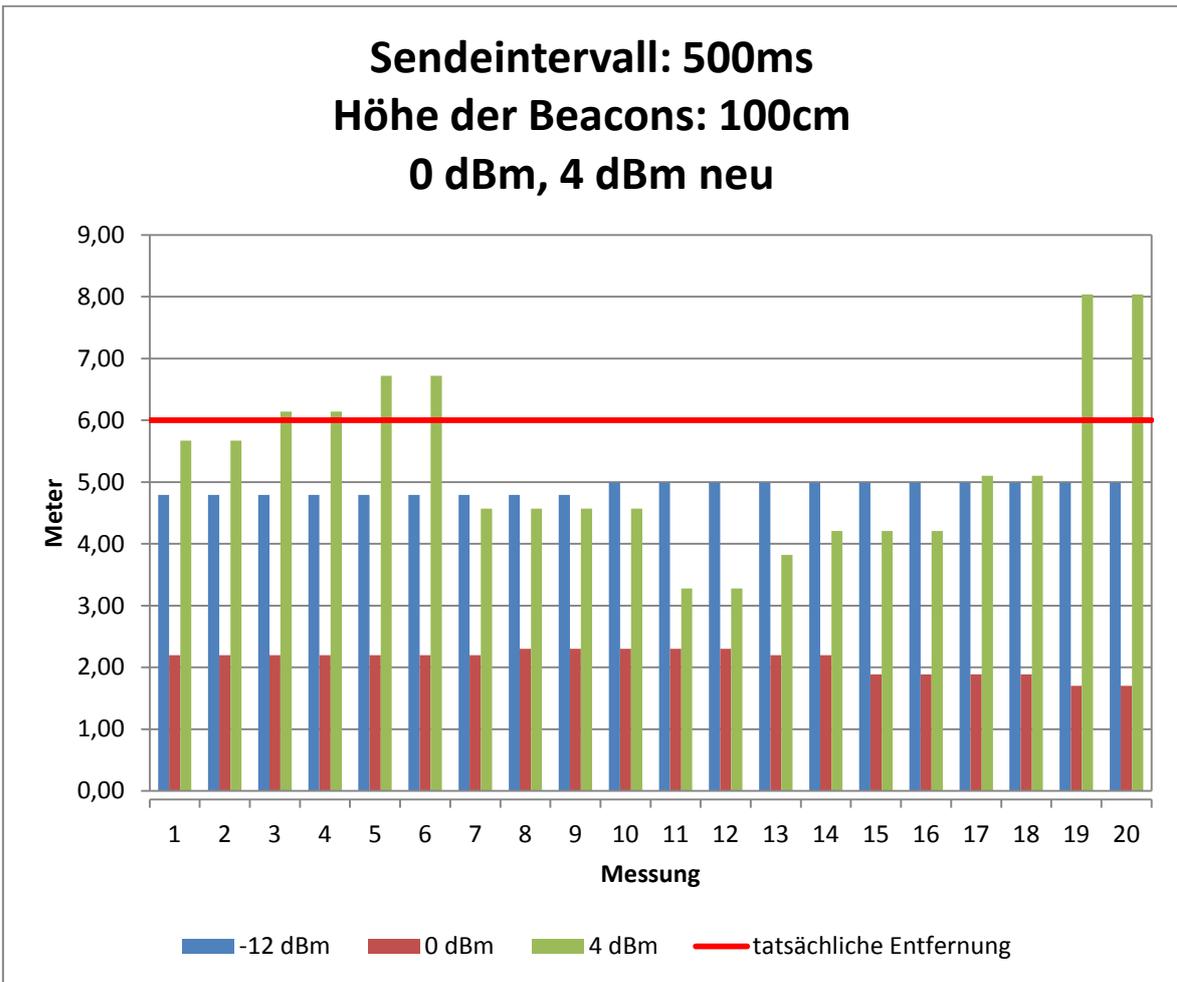
Das genaueste Ergebnis lieferte der Beacon mit einer Sendeleistung von -12 dBm.

Die Schwankungsbreite des Medians zwischen den Beacons lag bei 1,34 m.



Sendeleistung	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
Mittelwert	4,90 m	8,08 m	13,73 m
Abweichung Mittelwert	-1,10 m	2,08 m	7,73 m
Median	4,99 m	6,26 m	15,57 m
Abweichung Median	-1,01 m	0,26 m	9,57 m

Bei dieser Messung kamen wieder einige Ausreißer vor. Dieses Mal bei den Beacons mit der Sendeleistung 0 dBm und 4 dBm. Ich wiederholte diese Messung, um festzustellen ob die Ausreißer reproduzierbar sind.

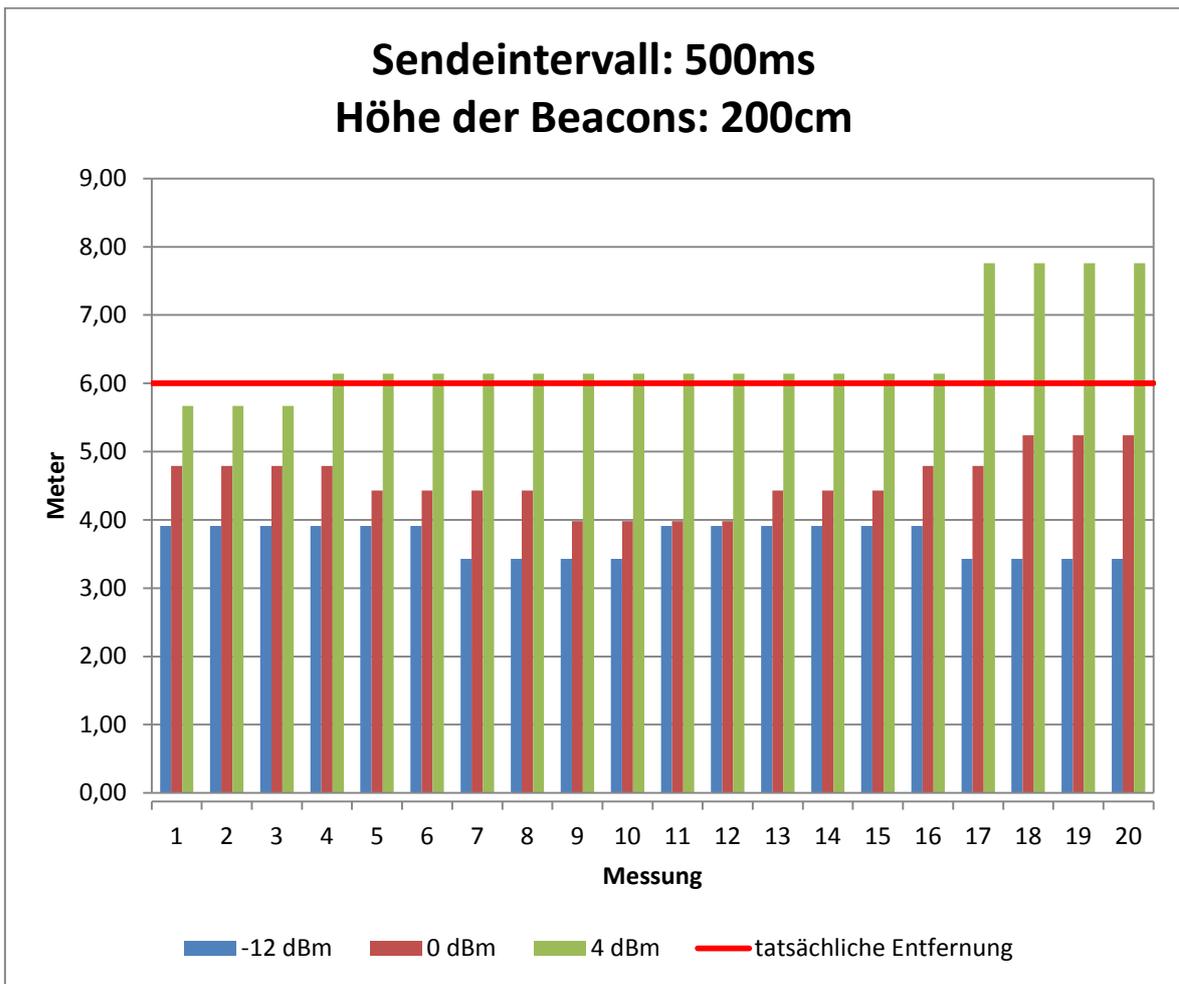


Sendeleistung	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
Mittelwert	4,90 m	2,11 m	5,23 m
Abweichung Mittelwert	-1,10 m	-3,89 m	-0,77 m
Median	4,99 m	2,20 m	4,84 m
Abweichung Median	-1,01 m	-3,80 m	-1,17 m

Bei der Wiederholung der Messung gab es die Ausreißer weder bei dem Beacon mit 0 dBm noch bei dem Beacon mit 4 dBm, was wieder auf einen nicht reproduzierbaren Messfehler hindeutet.

Das genaueste Ergebnis lieferte der Beacon mit einer Sendeleistung von -12 dBm.

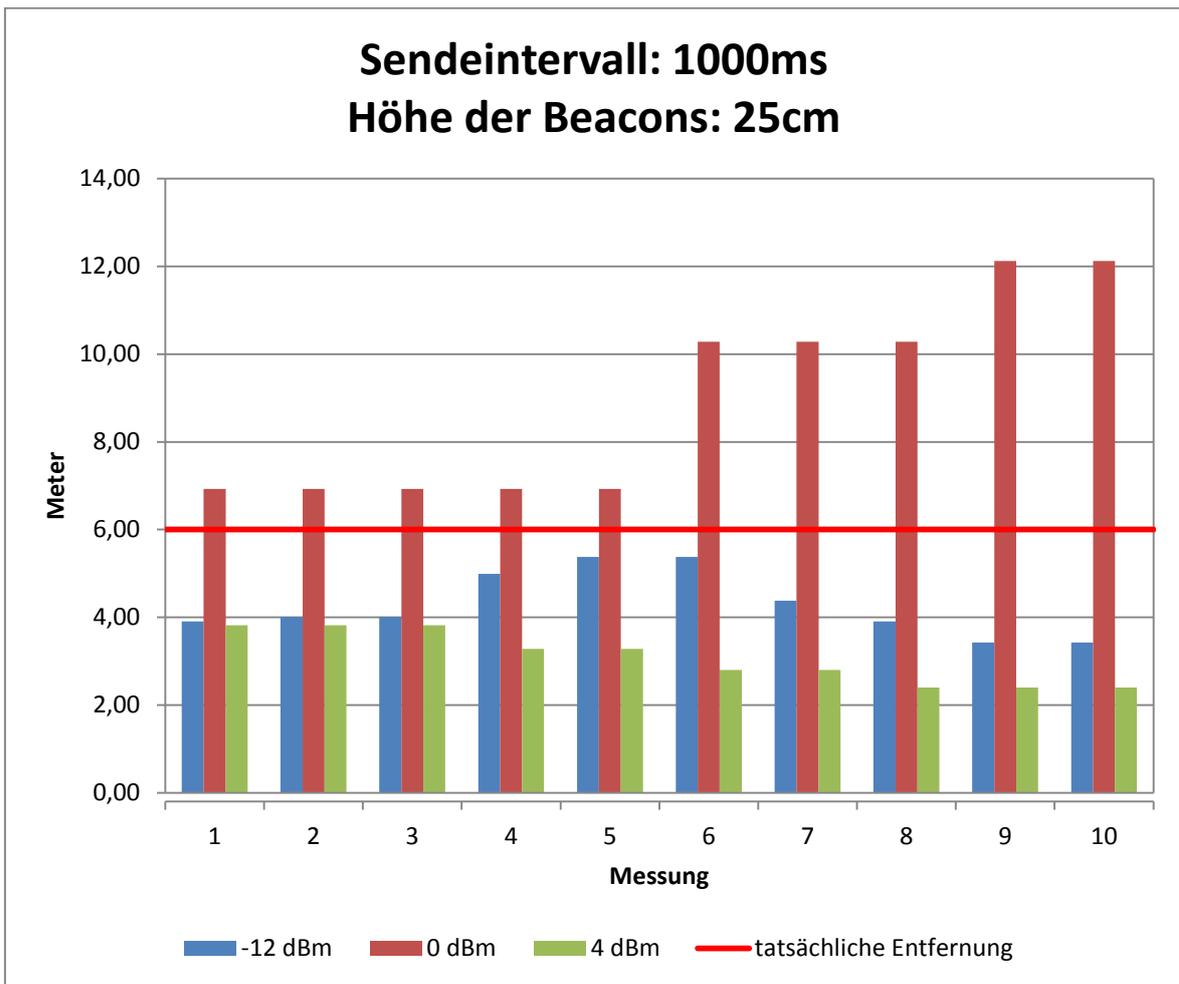
Die Schwankungsbreite des Medians zwischen den Beacons lag bei 2,63 m.



Sendeleistung	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
Mittelwert	3,72 m	4,57 m	6,39 m
Abweichung Mittelwert	-2,28 m	-1,43 m	0,39 m
Median	3,91 m	4,43 m	6,14 m
Abweichung Median	-2,09 m	-1,57 m	0,14 m

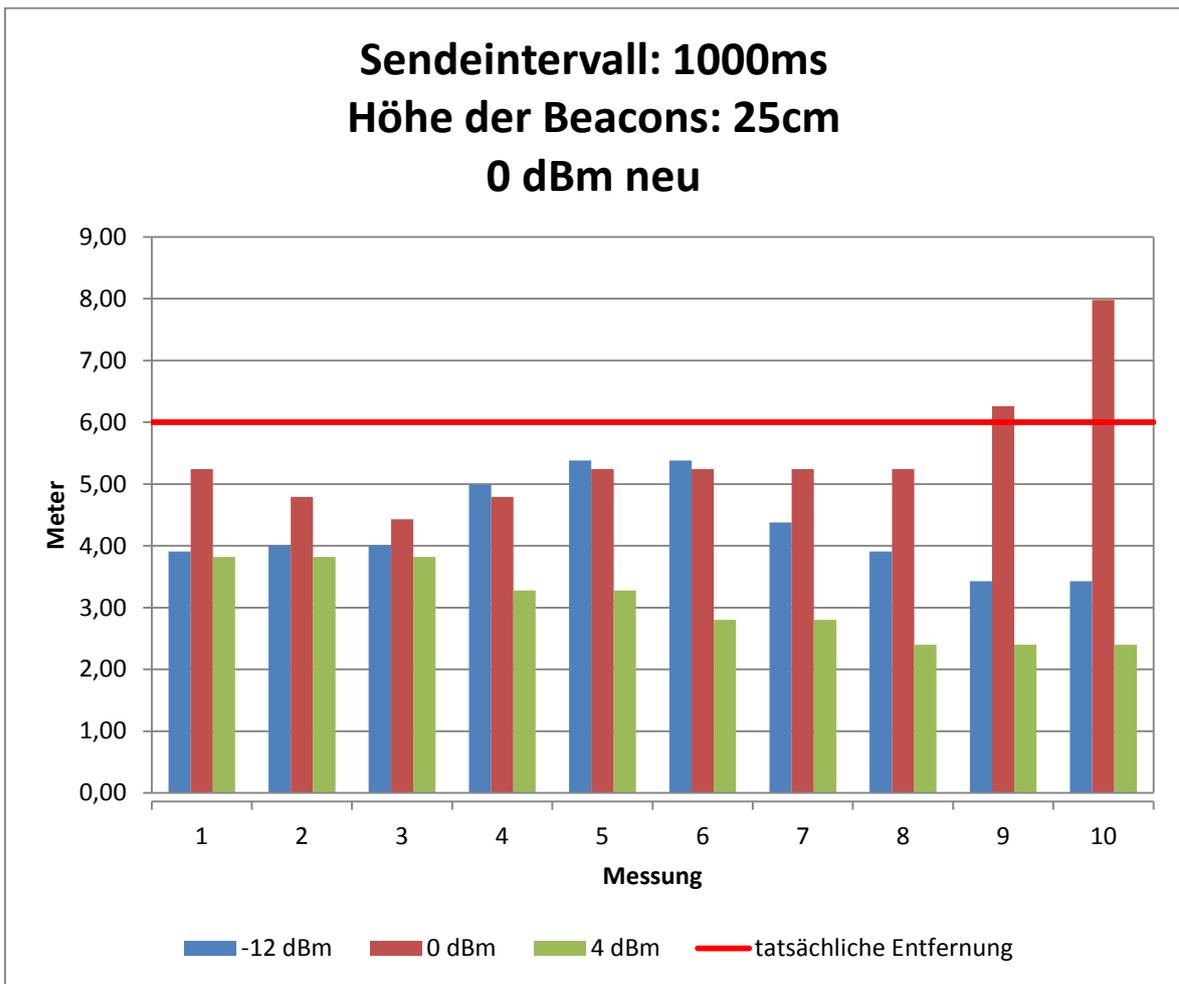
Das genaueste Ergebnis lieferte der Beacon mit einer Sendeleistung von 4 dBm.

Die Schwankungsbreite des Medians zwischen den Beacons lag bei 2,23 m.



Sendeleistung	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
Mittelwert	4,28 m	8,97 m	3,08 m
Abweichung Mittelwert	-1,72 m	2,97 m	-2,92 m
Median	4,01 m	8,61 m	3,04 m
Abweichung Median	-1,99 m	2,61 m	-2,96 m

Auch bei dieser Messung gab es beim Beacon mit 0 dBm Sendeleistung Ausreißer nach oben. Ich wiederholte die Messung abermals, um einen Messfehler auszuschließen.

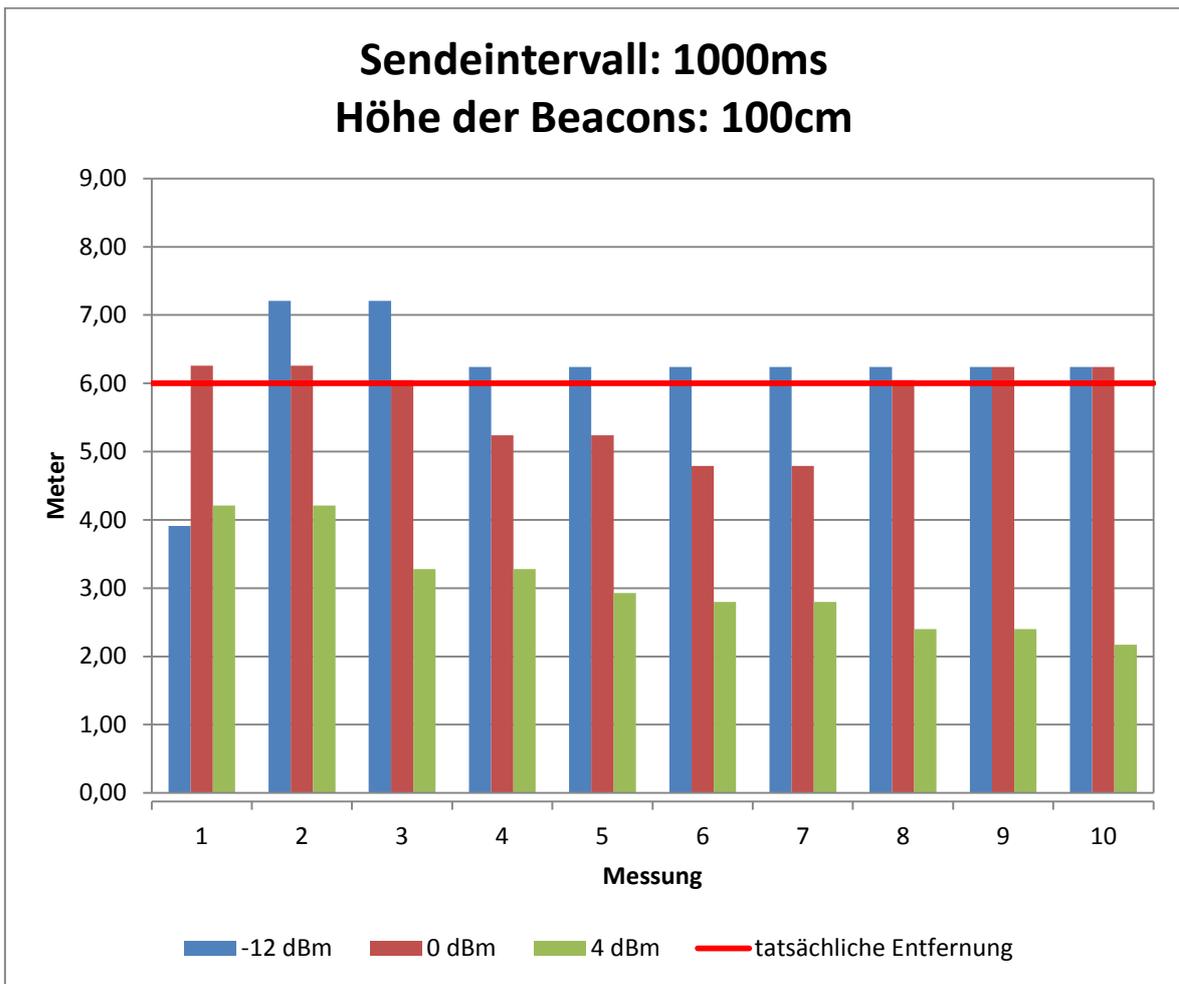


Sendeleistung	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
Mittelwert	4,28 m	5,45 m	3,08 m
Abweichung Mittelwert	-1,72 m	-0,56 m	-2,92 m
Median	4,01 m	5,24 m	3,04 m
Abweichung Median	-1,99 m	-0,76 m	-2,96 m

Bei der Wiederholung der Messung konnten keine großen Ausreißer mehr gemessen werden. Daher ist wiederum von einem nicht reproduzierbaren Messfehler auszugehen.

Das genaueste Ergebnis lieferte der Beacon mit einer Sendeleistung von 0 dBm.

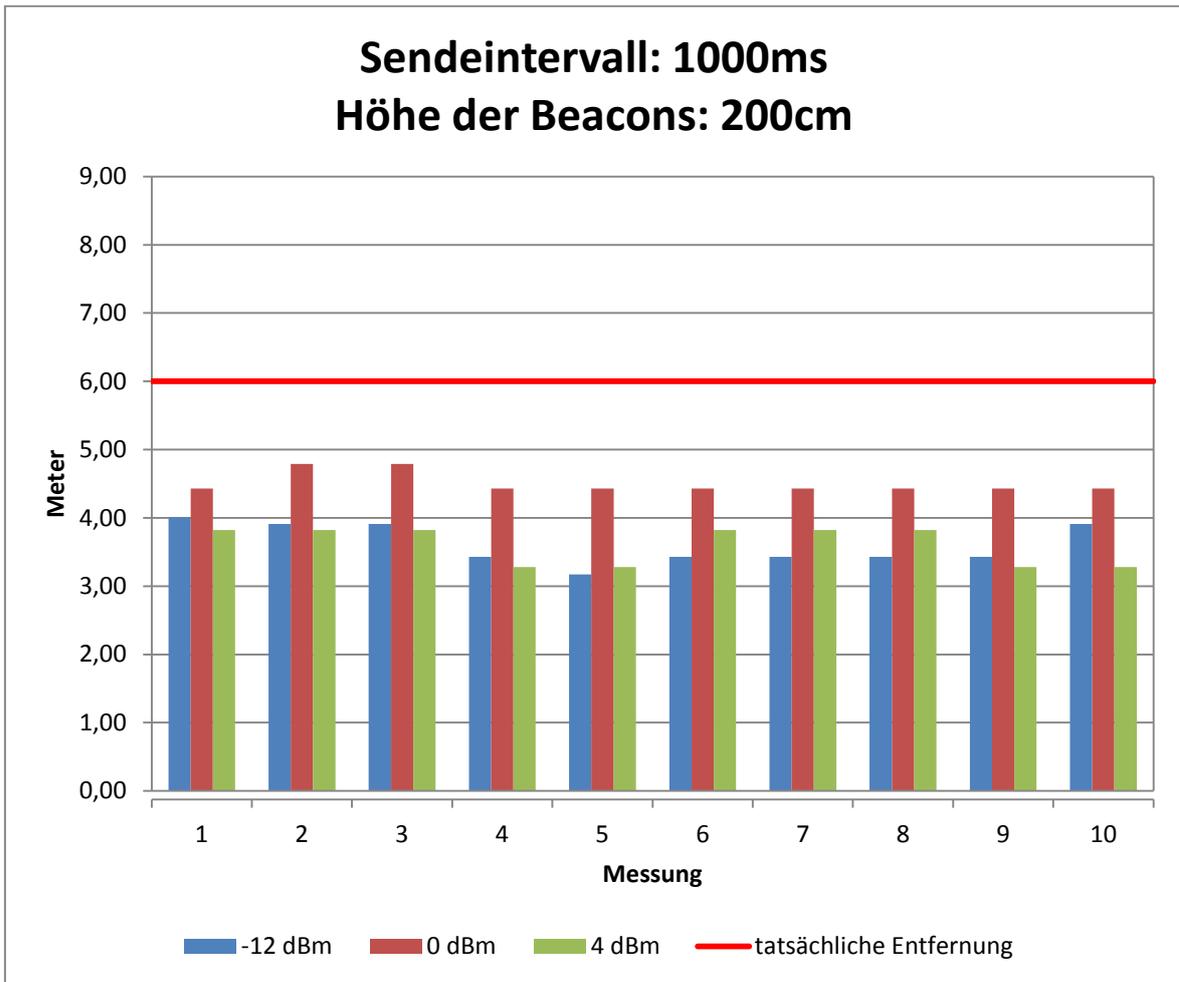
Die Schwankungsbreite des Medians zwischen den Beacons lag bei 2,2 m.



Sendeleistung	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
Mittelwert	6,20 m	5,72 m	3,05 m
Abweichung Mittelwert	0,20 m	-0,28 m	-2,95 m
Median	6,24 m	6,05 m	2,87 m
Abweichung Median	0,24 m	0,05 m	-3,14 m

Das genaueste Ergebnis lieferte der Beacon mit einer Sendeleistung von 0 dBm.

Die Schwankungsbreite des Medians zwischen den Beacons lag bei 3,38 m.



Sendeleistung	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
Mittelwert	3,61 m	4,50 m	3,60 m
Abweichung Mittelwert	-2,39 m	-1,50 m	-2,40 m
Median	3,43 m	4,43 m	3,82 m
Abweichung Median	-2,57 m	-1,57 m	-2,18 m

Das genaueste Ergebnis lieferte der Beacon mit einer Sendeleistung von 0 dBm.

Die Schwankungsbreite des Medians zwischen den Beacons lag bei 1 m.

3.3.2 Diskussion der Messergebnisse ohne Störquellen

Beim Vergleich der berechneten Größen Mittelwert und Median zeigt sich, dass im Großteil der Fälle der Median den genaueren Wert ausgibt. Das ist darauf zurückzuführen, dass der Median Ausreißer besser kompensiert.

Aus diesem Grund habe ich für den Vergleich der Messungen den Median verwendet.

Distanz 3 Meter:

Beim Vergleich der Messungen kann man grundsätzlich sagen, dass die Sendeleistung der Beacons keinen eindeutigen Einfluss auf die Genauigkeit hat. Bei den sechs verschiedenen Messungen hat jeder Beacon mit den drei unterschiedlichen Sendeleistungen je zwei Mal das genaueste Ergebnis. Die Schwankungsbreite zwischen den verschiedenen Sendeleistungen lag im Bereich von 0,04 m bis 2,27 m.

Beim Vergleich der Ergebnisse mit verschiedenen Sendeintervallen zeigt sich, dass die Genauigkeit mit einem Sendeintervall von 500 ms in zwei von drei Fällen besser ist als mit einem Sendeintervall von 1000 ms. Hier lag der Schwankungsbereich der einzelnen Beacons zwischen 0,48 m und 2,53 m.

Als letztes werden die Ergebnisse der unterschiedlichen Positionen der Beacons verglichen. Hier zeigt sich, dass bei einer Messung der Beacon in einer Höhe von 100 cm und einmal der Beacon in einer Höhe von 200 cm die besten Ergebnisse lieferte. Der Schwankungsbereich lag hier zwischen 0 m und 2,9 m.

Distanz 6 Meter:

Auch beim Vergleich der Messungen über 6 Meter hatte die Sendeleistung der Beacons keinen eindeutigen Einfluss auf die Genauigkeit. Bei den sechs verschiedenen Messungen brachte der Beacon mit der Sendeleistung 0 dBm drei Mal, der Beacon mit der Sendeleistung -12 dBm zwei Mal und der Beacon mit der Sendeleistung 4 dBm einmal das genaueste Ergebnis. Hier lag die Schwankung zwischen den verschiedenen Sendeleistungen im Bereich zwischen 0,16 m bis 3,38 m.

Beim Vergleich der Ergebnisse mit verschiedenen Sendeintervallen zeigt sich, dass auch bei einer Distanz von 6 Metern die Genauigkeit mit einem Sendeintervall von 500 ms in 2 von 3 Fällen besser ist als mit einem Sendeintervall von 1000 ms. Hier lag der Schwankungsbereich zwischen 0 m und 3,85 m.

Analog zu den Messungen in 3 Meter Entfernung lieferte einmal der Beacon in 100 cm Höhe und einmal der Beacon in 200 cm Höhe das beste Ergebnis. Der Schwankungsbereich lag hier zwischen 0,18 m und 2,81 m.

Abschließend ist festzuhalten, dass die Abweichungen des Medians zur tatsächlichen Entfernung von 3 Metern maximal 1,79 Meter und bei einer tatsächlichen Entfernung von 6 Metern maximal 3,8 Meter betragen. Die Ergebnisse liegen durchaus in dem, von der Firma Estimote angegebenen, möglichen Abweichungsbereich (Borowicz, 2015).

Aufgrund der Abweichungen und Schwankungsbreiten kann man bei den Messungen ohne Störquellen noch keine Aussagen über die beste Konstellation der Sender machen. Dazu ist es notwendig, die Messergebnisse mit Störquellen einzubeziehen.

3.3.3 Messung mit Störquellen

Als zweite Versuchsreihe wurde die Messung mit Störquellen zwischen dem Sender und dem Empfänger durchgeführt. Dazu steht eine Person in der direkten Linie zwischen dem Sender und dem Empfänger. Die anderen Parameter sind die gleichen wie in der Versuchsreihe ohne Störquellen.

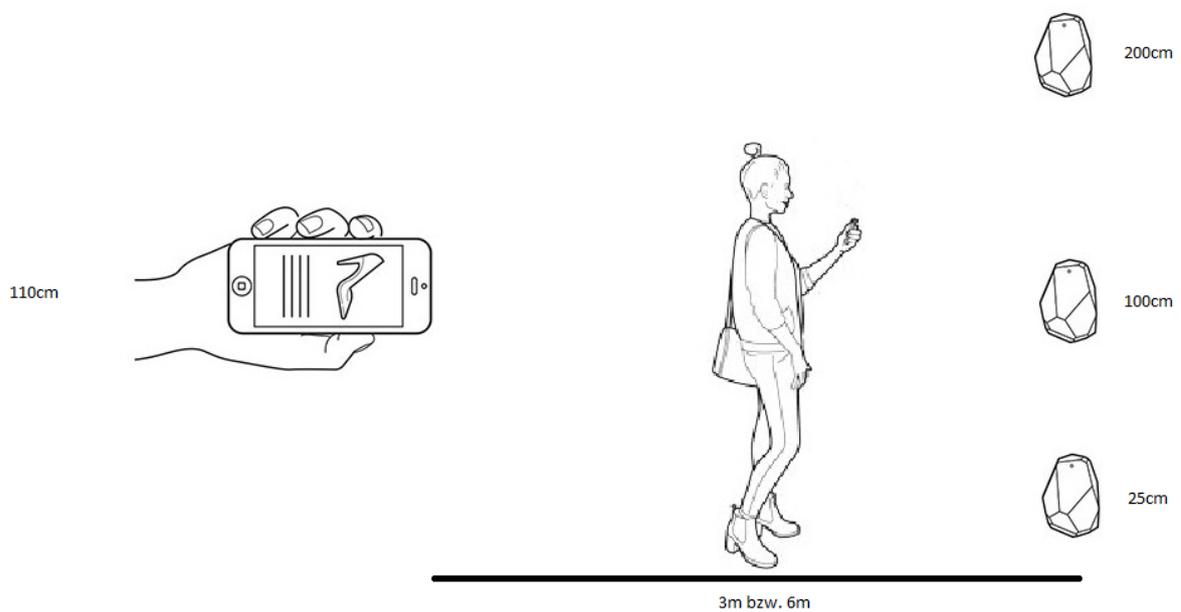
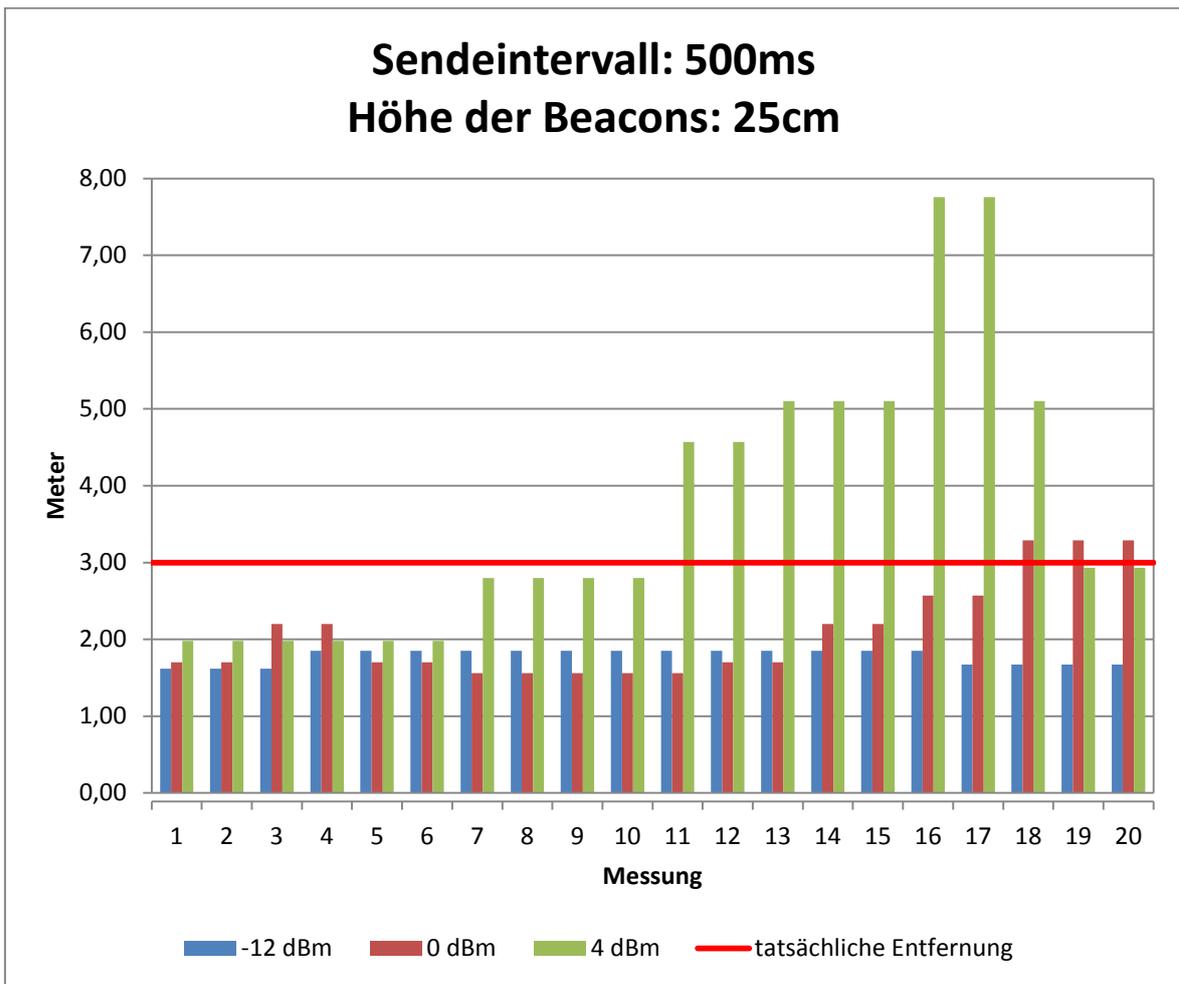


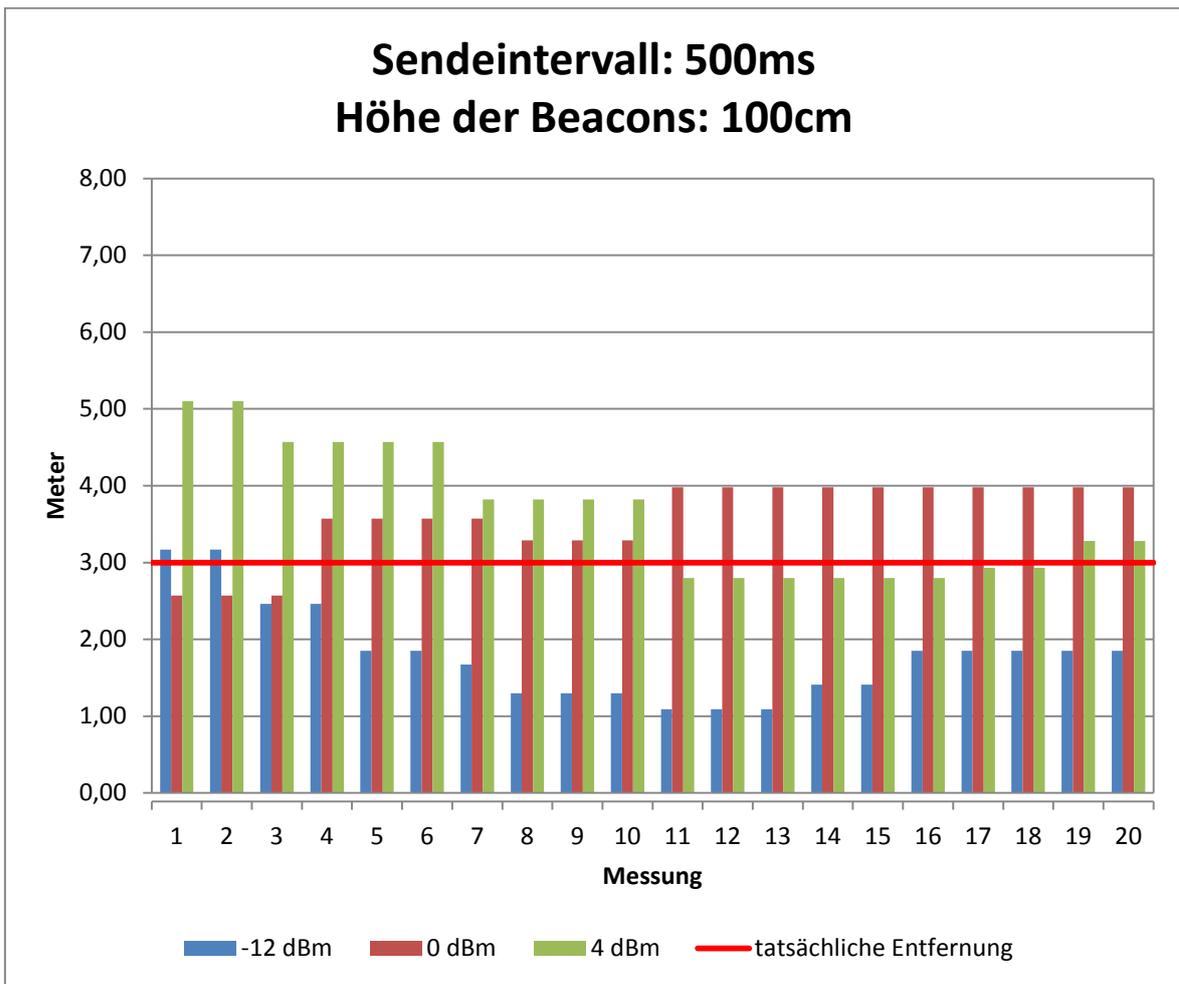
Abbildung 21 Skizze des Versuchsaufbaus mit Störquellen (Estimote, 2014)



Sendeleistung	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
Mittelwert	1,78 m	2,09 m	3,70 m
Abweichung Mittelwert	-1,22 m	-0,91 m	0,70 m
Median	1,85 m	1,70 m	2,87 m
Abweichung Median	-1,15 m	-1,30 m	-0,14 m

Das genaueste Ergebnis lieferte der Beacon mit einer Sendeleistung von 4 dBm.

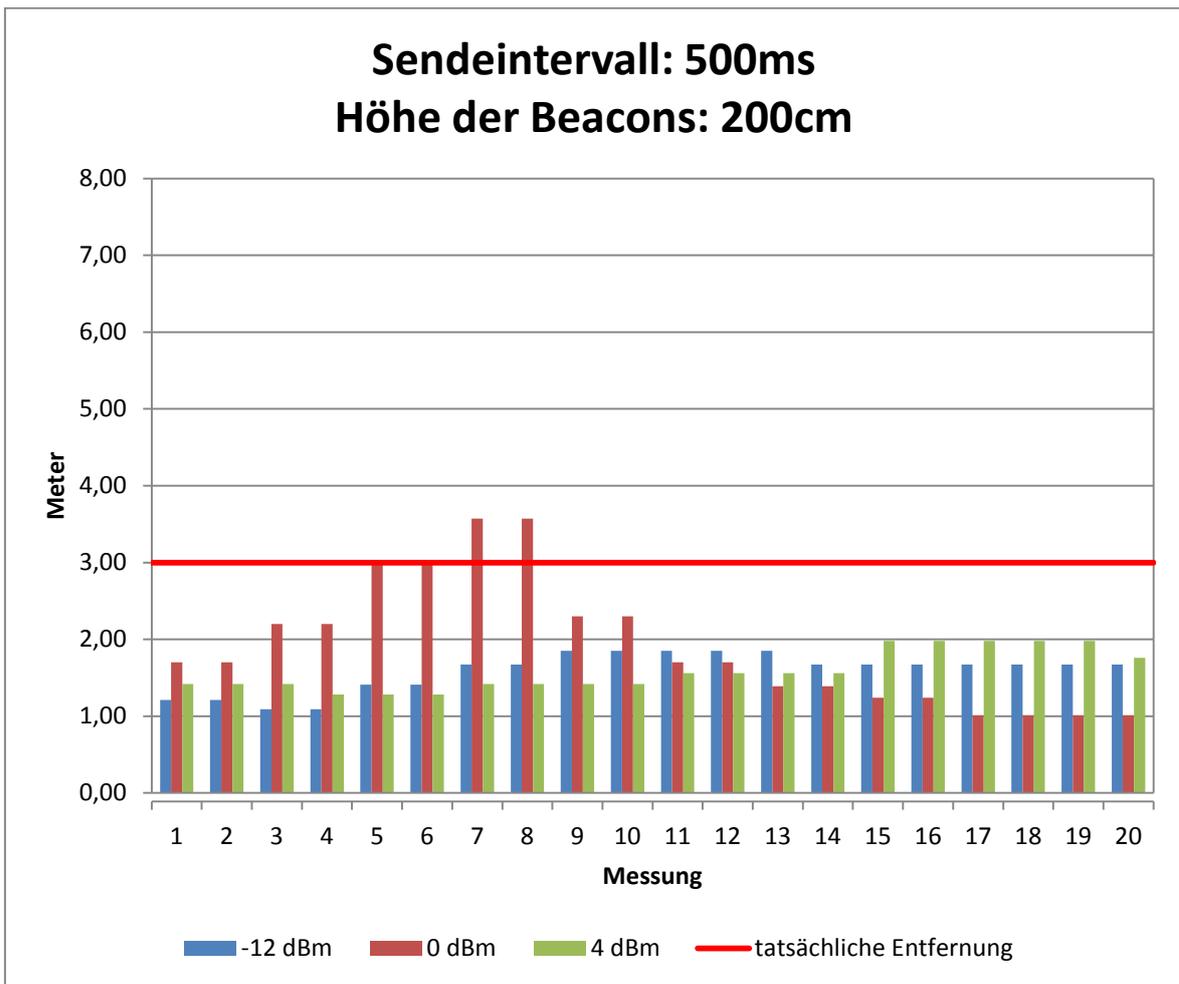
Die Schwankungsbreite des Medians zwischen den Beacons lag bei 1,16 m.



Sendeleistung	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
Mittelwert	1,79 m	3,58 m	3,65 m
Abweichung Mittelwert	-1,21 m	0,58 m	0,65 m
Median	1,85 m	3,78 m	3,55 m
Abweichung Median	-1,15 m	0,78 m	0,55 m

Das genaueste Ergebnis lieferte der Beacon mit einer Sendeleistung von 4 dBm.

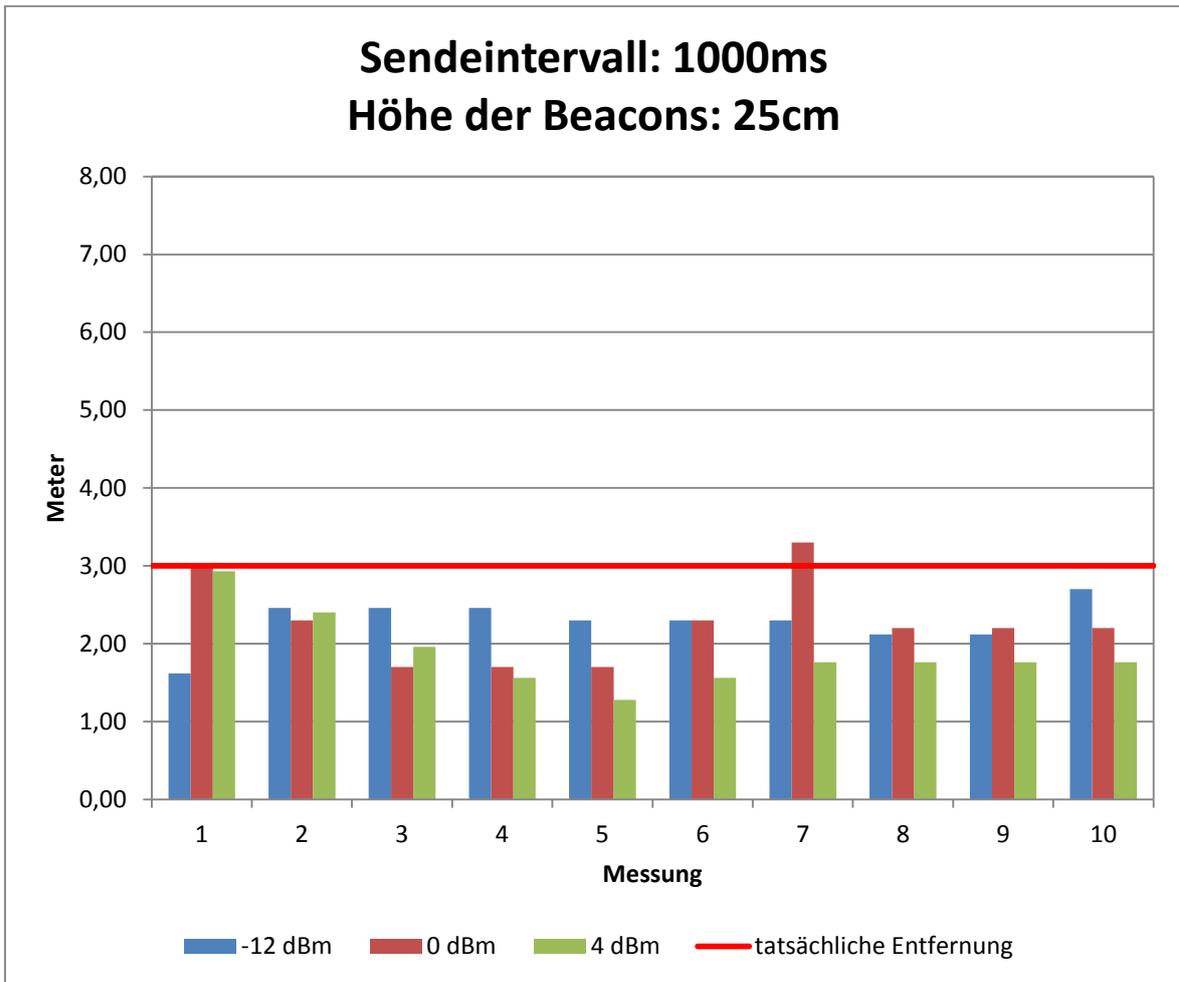
Die Schwankungsbreite des Medians zwischen den Beacons lag bei 1,93 m.



Sendeleistung	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
Mittelwert	1,59 m	1,91 m	1,58 m
Abweichung Mittelwert	-1,42 m	-1,09 m	-1,42 m
Median	1,67 m	1,70 m	1,49 m
Abweichung Median	-1,33 m	-1,30 m	-1,51 m

Das genaueste Ergebnis lieferte der Beacon mit einer Sendeleistung von 0 dBm.

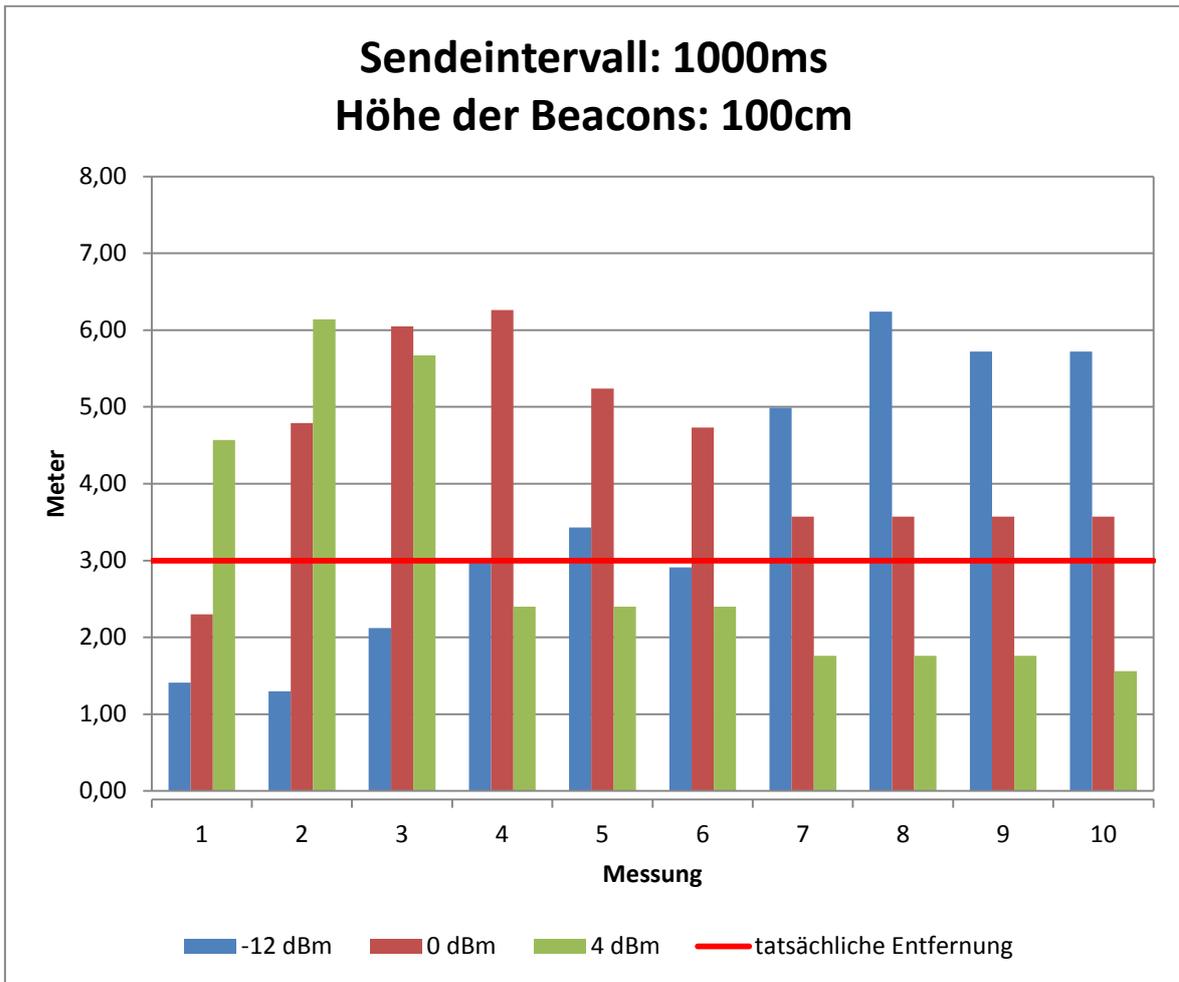
Die Schwankungsbreite des Medians zwischen den Beacons lag bei 0,21 m.



Sendeleistung	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
Mittelwert	2,28 m	2,26 m	1,87 m
Abweichung Mittelwert	-0,72 m	-0,74 m	-1,13 m
Median	2,30 m	2,20 m	1,76 m
Abweichung Median	-0,70 m	-0,80 m	-1,24 m

Das genaueste Ergebnis lieferte der Beacon mit einer Sendeleistung von -12 dBm.

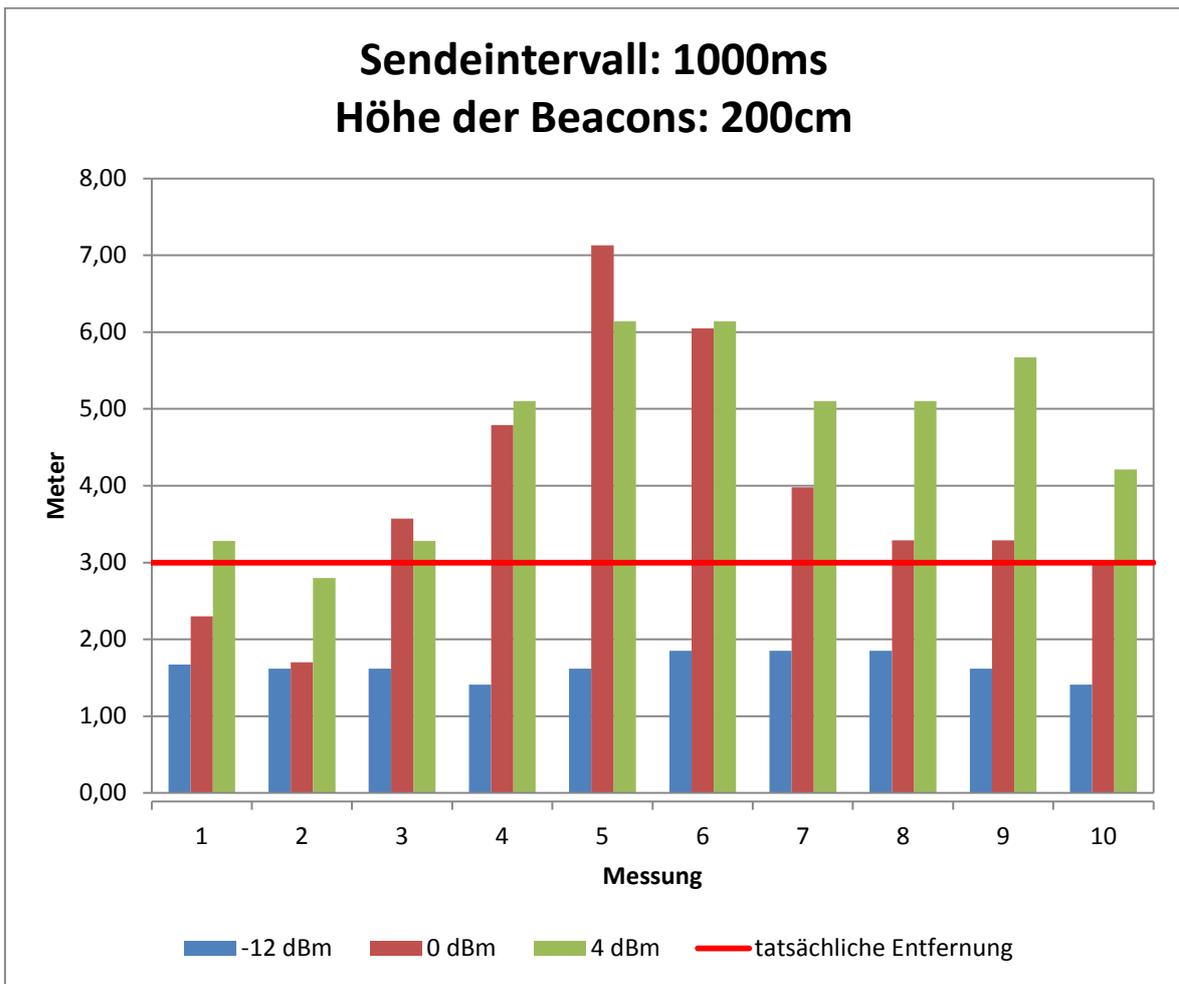
Die Schwankungsbreite des Medians zwischen den Beacons lag bei 0,54 m.



Sendeleistung	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
Mittelwert	3,68 m	4,37 m	3,04 m
Abweichung Mittelwert	0,68 m	1,37 m	0,04 m
Median	3,20 m	4,15 m	2,40 m
Abweichung Median	0,20 m	1,15 m	-0,60 m

Das genaueste Ergebnis lieferte der Beacon mit einer Sendeleistung von -12 dBm.

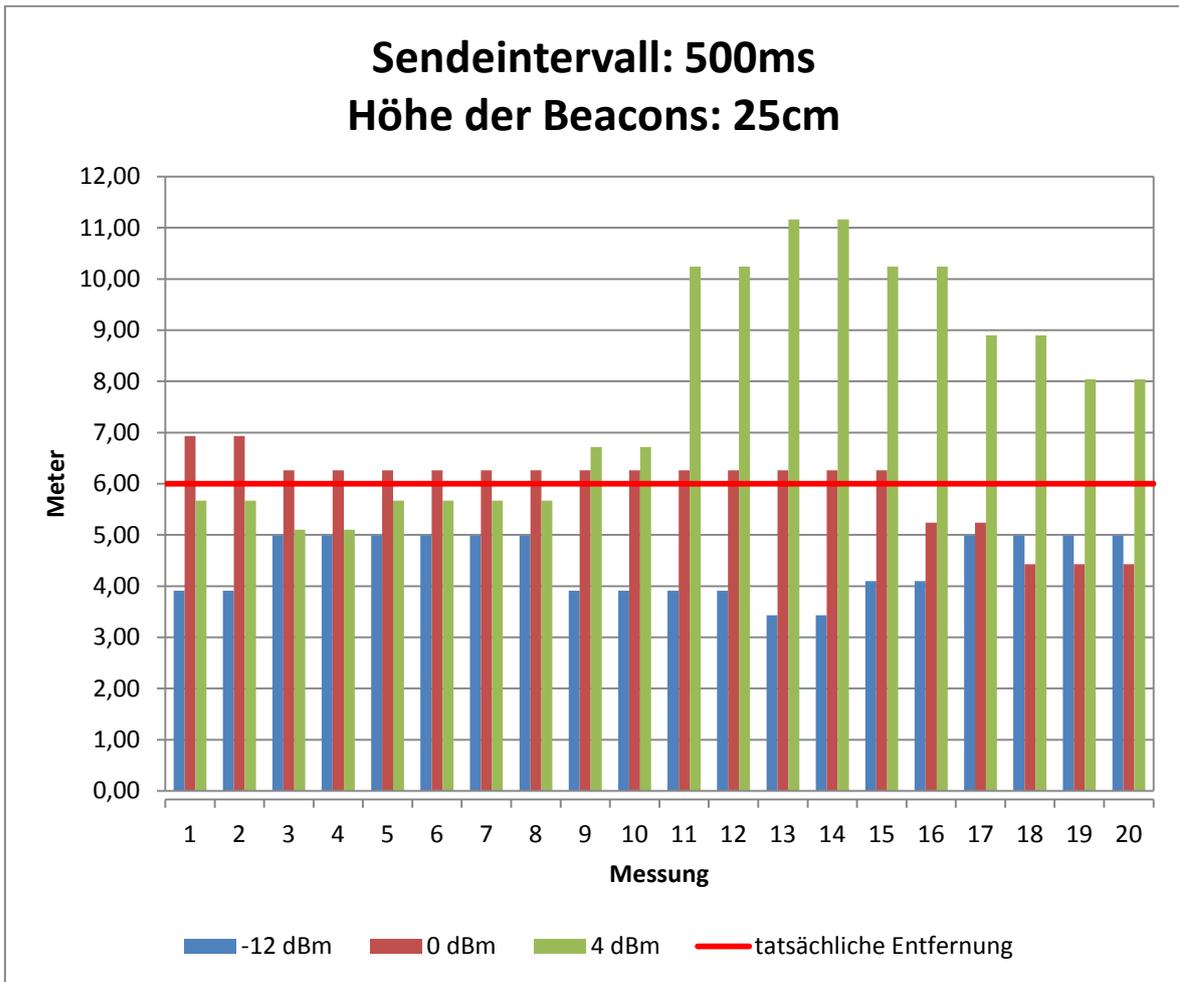
Die Schwankungsbreite des Medians zwischen den Beacons lag bei 1,75 m.



Sendeleistung	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
Mittelwert	1,65 m	3,91 m	4,68 m
Abweichung Mittelwert	-1,35 m	0,91 m	1,68 m
Median	1,62 m	3,43 m	5,10 m
Abweichung Median	-1,38 m	0,43 m	2,10 m

Das genaueste Ergebnis lieferte der Beacon mit einer Sendeleistung von 0 dBm.

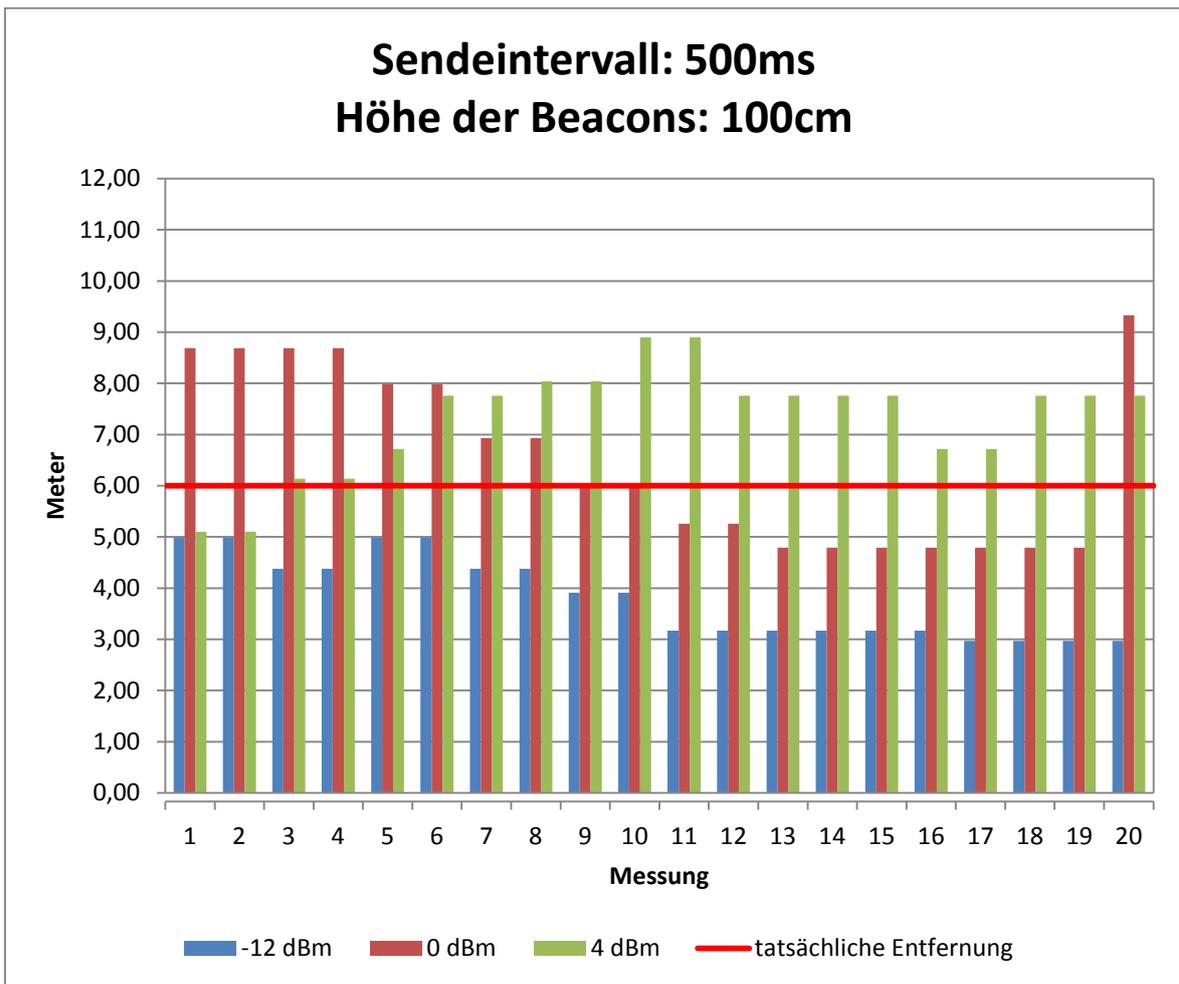
Die Schwankungsbreite des Medians zwischen den Beacons lag bei 3,48 m.



Sendeleistung	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
Mittelwert	4,42 m	5,95 m	7,74 m
Abweichung Mittelwert	-1,58 m	-0,05 m	1,74 m
Median	4,55 m	6,26 m	7,38 m
Abweichung Median	-1,46 m	0,26 m	1,38 m

Das genaueste Ergebnis lieferte der Beacon mit einer Sendeleistung von 0 dBm.

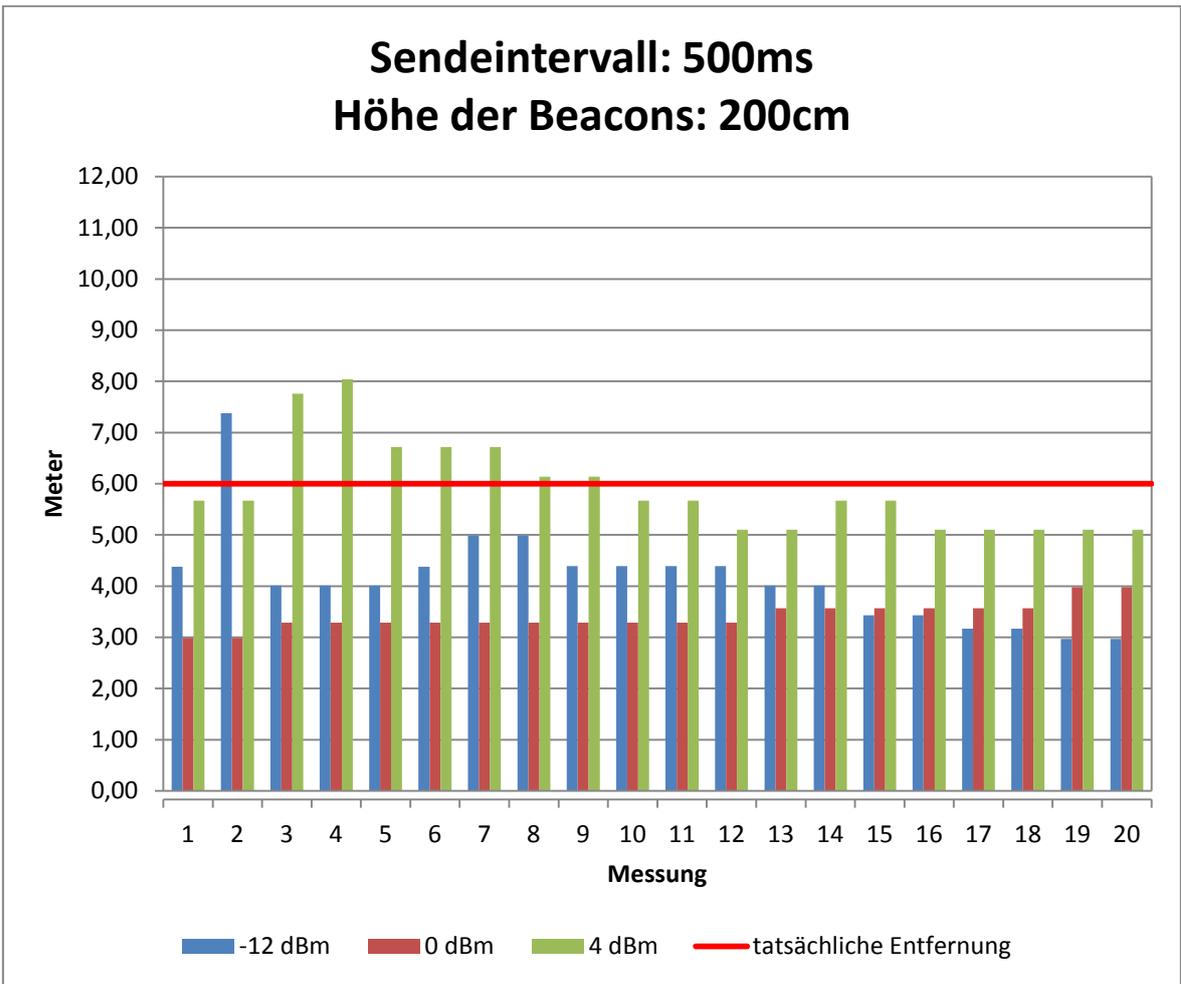
Die Schwankungsbreite des Medians zwischen den Beacons lag bei 2,84 m.



Sendeleistung	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
Mittelwert	3,81 m	6,50 m	7,32 m
Abweichung Mittelwert	-2,19 m	0,50 m	1,32 m
Median	3,54 m	6,05 m	7,76 m
Abweichung Median	-2,46 m	0,05 m	1,76 m

Das genaueste Ergebnis lieferte der Beacon mit einer Sendeleistung von 0 dBm.

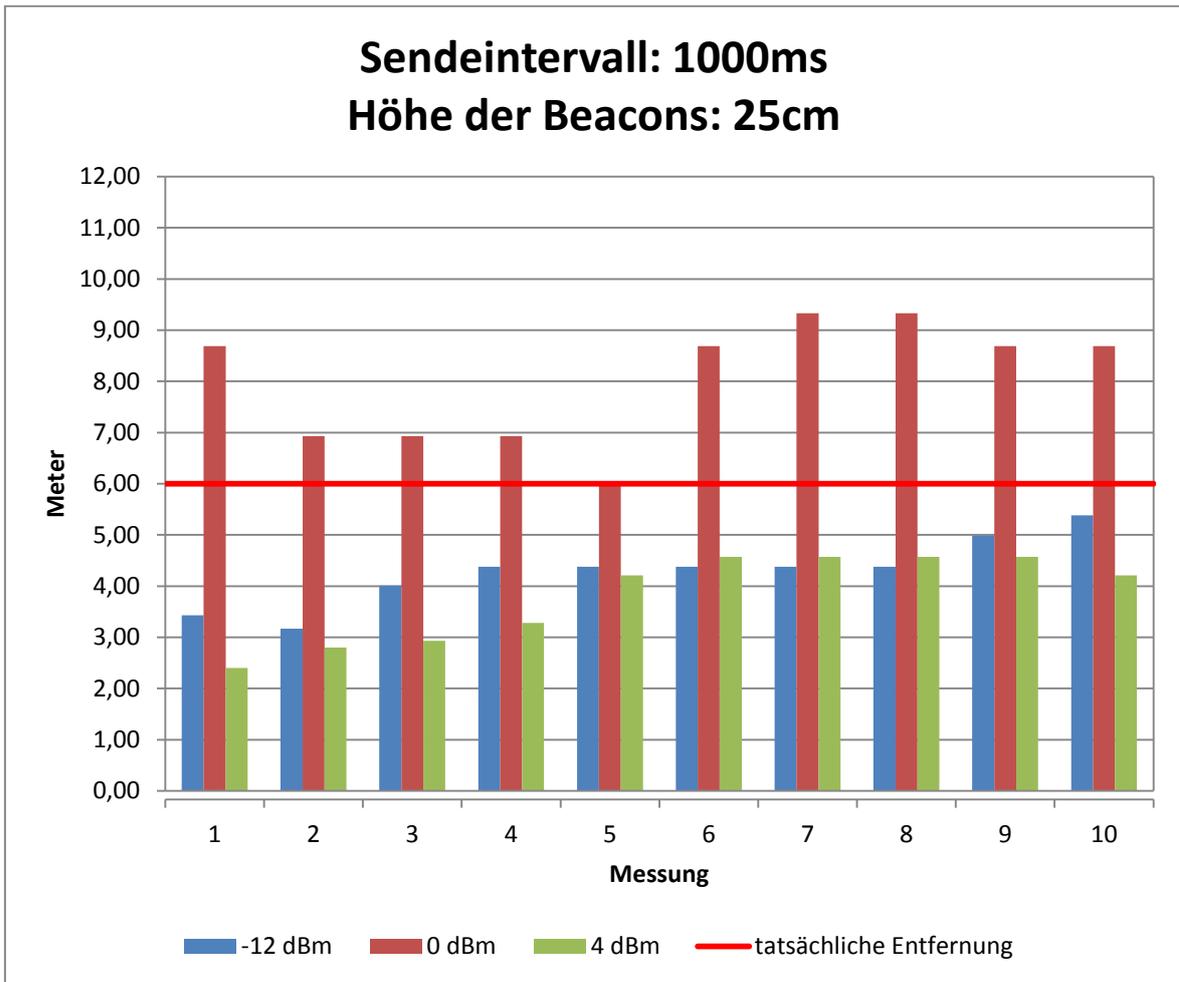
Die Schwankungsbreite des Medians zwischen den Beacons lag bei 4,22 m.



Sendeleistung	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
Mittelwert	4,14 m	3,41 m	5,90 m
Abweichung Mittelwert	-1,86 m	-2,59 m	-0,10 m
Median	4,01 m	3,29 m	5,67 m
Abweichung Median	-1,99 m	-2,71 m	-0,33 m

Das genaueste Ergebnis lieferte der Beacon mit einer Sendeleistung von 4 dBm.

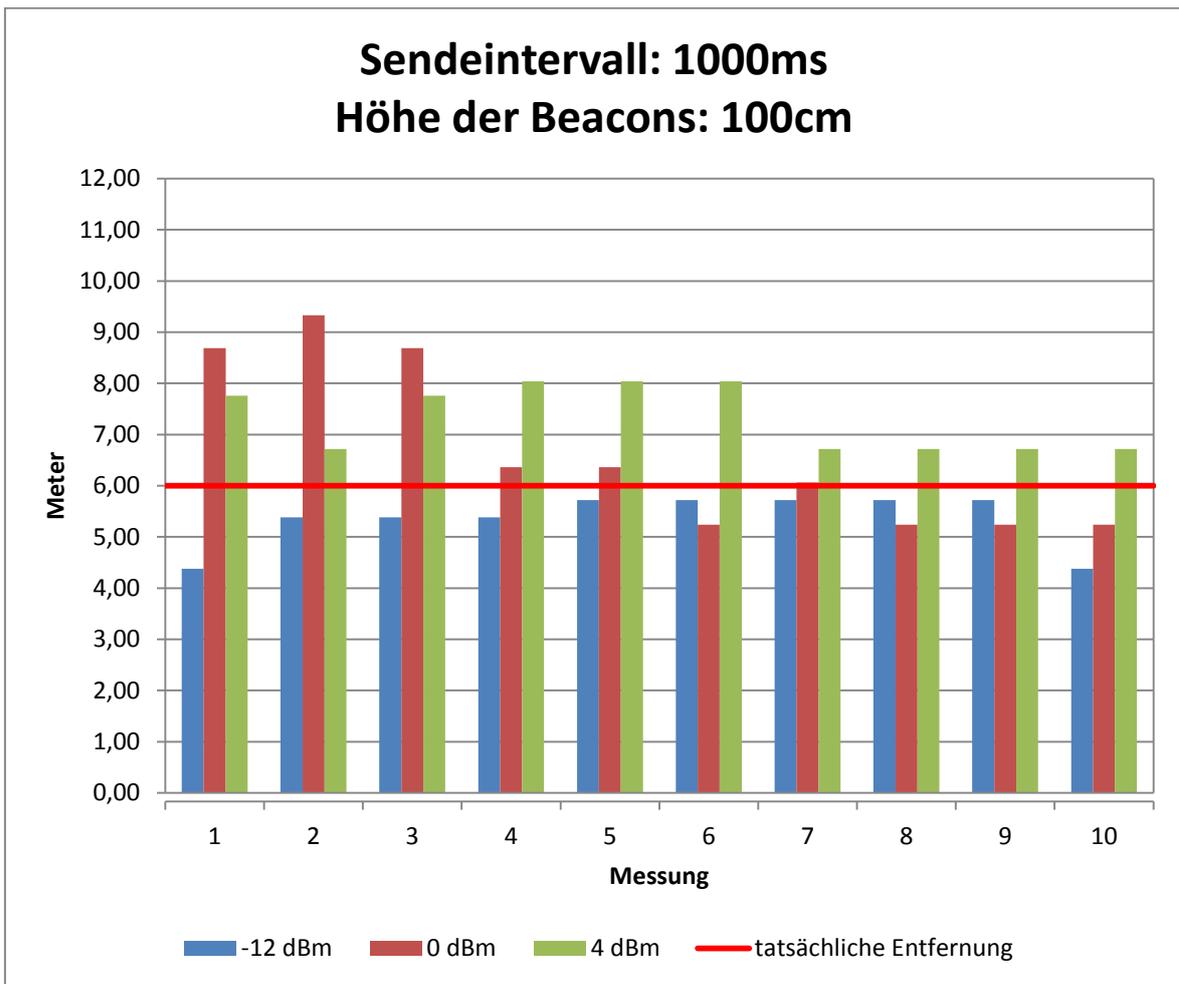
Die Schwankungsbreite des Medians zwischen den Beacons lag bei 2,38 m.



Sendeleistung	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
Mittelwert	4,29 m	8,03 m	3,81 m
Abweichung Mittelwert	-1,71 m	2,03 m	-2,19 m
Median	4,38 m	8,69 m	4,21 m
Abweichung Median	-1,62 m	2,69 m	-1,79 m

Das genaueste Ergebnis lieferte der Beacon mit einer Sendeleistung von -12 dBm.

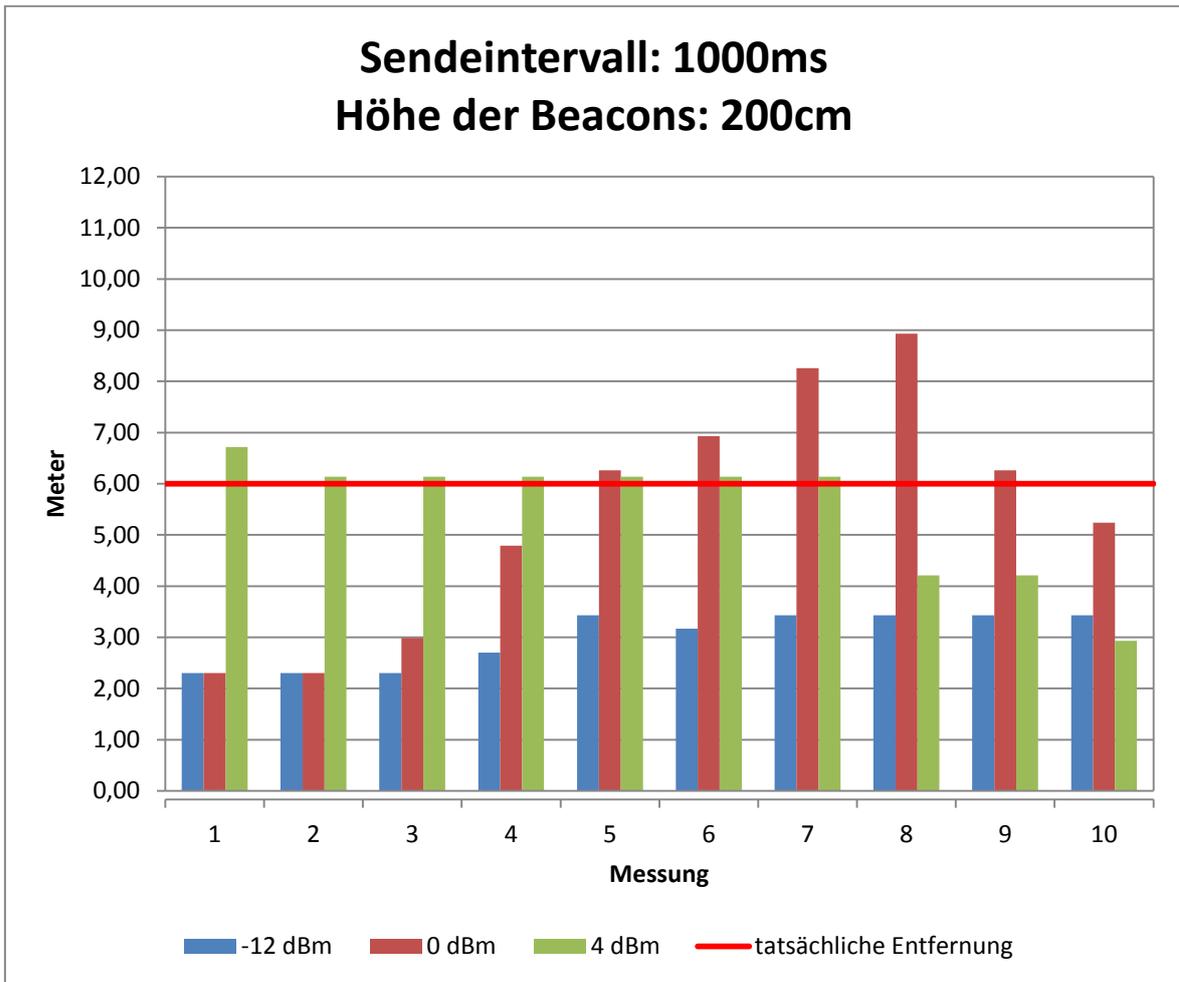
Die Schwankungsbreite des Medians zwischen den Beacons lag bei 4,48 m.



Sendeleistung	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
Mittelwert	5,35 m	6,65 m	7,32 m
Abweichung Mittelwert	-0,65 m	0,65 m	1,32 m
Median	5,55 m	6,21 m	7,24 m
Abweichung Median	-0,45 m	0,21 m	1,24 m

Das genaueste Ergebnis lieferte der Beacon mit einer Sendeleistung von 0 dBm.

Die Schwankungsbreite des Medians zwischen den Beacons lag bei 1,69 m.



Sendeleistung	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
Mittelwert	2,99 m	5,43 m	5,49 m
Abweichung Mittelwert	-3,01 m	-0,57 m	-0,51 m
Median	3,30 m	5,75 m	6,14 m
Abweichung Median	-2,70 m	-0,25 m	0,14 m

Das genaueste Ergebnis lieferte der Beacon mit einer Sendeleistung von 4 dBm.

Die Schwankungsbreite des Medians zwischen den Beacons lag bei 2,84 m.

3.3.4 Diskussion der Messergebnisse mit Störquellen

Auch bei dieser Versuchsreihe stellt sich der Median bei mehr Messungen als der genauere Wert dar. Aus diesem Grund verwende ich auch hier den Median für den Vergleich der Messungen.

Distanz 3 Meter:

Beim Vergleich der Messungen mit Störquellen kann man erkennen, dass die Sendeleistung der Beacons keinen eindeutigen Einfluss auf die Genauigkeit hat. Gleich wie bei den Messungen ohne Störquellen liefert jeder Beacon mit den drei unterschiedlichen Sendeleistungen je zwei Mal das genaueste Ergebnis. Die Schwankung zwischen den verschiedenen Sendeleistungen liegt im Bereich von 0,03 m bis 3,48 m.

Beim Vergleich der Ergebnisse mit verschiedenen Sendeintervallen zeigt sich, dass die Genauigkeit mit einem Sendeintervall von 500 ms nur in einem von drei Fällen besser ist als mit einem Sendeintervall von 1000 ms. Hier liegt der Schwankungsbereich der einzelnen Beacons zwischen 0,05 m und 3,61 m.

Als letztes werden auch hier die Ergebnisse der unterschiedlichen Positionen der Beacons verglichen. Hier zeigt sich, dass bei einer Messung der Beacon in einer Höhe von 25 cm und einmal der Beacon in einer Höhe von 100 cm das beste Ergebnis lieferte. Der Schwankungsbereich liegt hier zwischen 0 m und 3,34 m.

Distanz 6 Meter:

Beim Vergleich der Messungen über 6 Meter hat die Sendeleistung der Beacons doch einen merkbaren Einfluss auf die Genauigkeit. Bei den sechs verschiedenen Messungen brachte der Beacon mit der Sendeleistung 0 dBm drei Mal, der Beacon mit der Sendeleistung 4 dBm zwei Mal und der Beacon mit der Sendeleistung -12 dBm nur einmal das genaueste Ergebnis. Das lässt darauf schließen, dass bei größeren Entfernungen Beacons mit höherer Sendeleistung ein genaueres Ergebnis liefern. Das bestätigt auch die größere maximale Schwankung, die im Bereich von 0,17 m bis 4,48 m liegt.

Beim Vergleich der Ergebnisse mit verschiedenen Sendeintervallen zeigt sich, dass auch bei einer Distanz von 6 Metern die Genauigkeit mit einem Sendeintervall von 500 ms in zwei von drei Fällen besser ist als mit einem Sendeintervall von 1000 ms. Hier liegt der Schwankungsbereich zwischen 0,16 m und 3,17 m.

Bei unterschiedlichen Senderhöhen lieferte einmal der Beacon in 100 cm Höhe und einmal der Beacon in 200 cm Höhe das beste Ergebnis. Der Schwankungsbereich liegt hier zwischen 0,21 m und 3,03 m.

Die Abweichungen des Medians zur tatsächlichen Entfernung von 3 Metern betragen maximal 2,1 Meter und bei einer tatsächlichen Entfernung von 6 Metern maximal 2,71 Meter.

3.3.5 Vergleich der Ergebnisse ohne und mit Störquellen

Die Messungen mit und ohne Störquellen zeigten, dass der Unterschied zwischen den Ergebnissen nicht sehr groß ist. Bei einer Distanz von 3 Metern betragen die maximalen Abweichungen 1,79 Meter bei der Messung ohne Störquellen und 2,1 Meter bei der Messung mit Störquellen. Bei einer Entfernung von 6 Metern betragen die maximalen Abweichungen 3,8 Meter (ohne Störquellen) und 2,71 Meter (mit Störquellen). Interessant ist, dass die maximale Abweichung bei einer Entfernung von 6 Metern ohne Störquellen höher ist als mit Störquellen. Das kann jedoch zum Beispiel auf ungenaue Messergebnisse bei einzelnen Messreihen zurückzuführen sein.

Welche technischen Parameter und geometrischen Konstellationen sind nun am besten geeignet, um gute Ergebnisse zu bekommen?

Bei geringen Entfernungen ist die Sendeleistung nicht sehr ausschlaggebend. Die Abweichung des Beacons mit Sendeleistung -12 dBm bewegt sich zwischen 0,2 m und 1,38 m bei einer tatsächlichen Distanz von 3 Metern. Bei größeren Distanzen (6 Meter) hingegen bewegt sich die Abweichung zwischen 0,24 m und 2,7 m. Eine Sendeleistung von 0 dBm stellt sich als guter Kompromiss zwischen der Genauigkeit und der

Batterielebensdauer dar, da die Lebensdauer der Batterie mit höherer Sendeleistung abnimmt.

Das Sendeintervall beeinflusst die Genauigkeit hingegen schon mehr. Bei vier von sechs Messungen wurden bessere Ergebnisse mit einem Sendeintervall von 500 ms erzielt. Nur bei zwei Messungen waren die Ergebnisse mit einem Sendeintervall von 1000 ms besser. Hier kann es sinnvoll sein, das Sendeintervall geringer zu wählen, was zwar eine kürzere Batterielebensdauer zur Folge hat, aber die Genauigkeit wird verbessert und das Signal wird stabiler.

Ein wichtiger Aspekt ist auch die Positionierung der Beacons. Bei den Messungen stellte sich heraus, dass eine Positionierung der Beacons knapp über dem Boden die schlechtesten Ergebnisse brachte. Die besten Ergebnisse wurden mit Beacons in einer Höhe von 100 cm und 200 cm erzielt. Die guten Messergebnisse in 100 cm Höhe sind darauf zurückzuführen, dass sich der Sender und das Empfangsgerät in fast gleicher Höhe befanden. Allerdings wird dieser Vorteil nicht mehr gegeben sein, wenn mehrere Störquellen vorhanden sind (wie zum Beispiel mehrere Personen, die sich zwischen dem Sender und dem Empfänger befinden). Deshalb ist es in Umgebungen, in denen größere Menschenmengen zu erwarten sind, empfehlenswert, Beacons in einer Höhe zu installieren, die über der durchschnittlichen Größe eines Menschen liegt.

Die Messungen zeigen, dass die Genauigkeit höher ist, je näher sich der Empfänger am Sender befindet. Das bedeutet, dass für eine höhere Genauigkeit eine größere Anzahl an Beacons notwendig ist, um die Distanzen zum nächsten Sender möglichst gering zu halten.

4 Anwendungsfälle für Indoor-Location-Based-Services

Indoor-Navigation beziehungsweise Indoor-Location-Based-Services werden ein immer interessanteres und vor allem verbreiteteres Themengebiet.

Einerseits gibt es immer mehr Möglichkeiten, Indoor-Navigation technisch mittels WLAN, Bluetooth Low Energy, RFID, etc. umzusetzen und andererseits sind mobile Empfangsgeräte (Smartphones, Tablets) schon sehr weit verbreitet. Es gibt sehr viele Anwendungsmöglichkeiten, bei denen Indoor-Navigation sinnvoll einsetzbar ist und einen Mehrwert sowohl für den Betreiber als auch für den Nutzer bedeutet.

Ich habe mich für drei Anwendungsfälle für Indoor-Location-Based-Services entschieden, die ich im folgenden Kapitel näher beschreiben werde.

Eine zwingende Voraussetzung für alle Anwendungsbereiche ist eine App, die auf dem Smartphone oder dem Tablet installiert sein muss. Ohne eine solche App ist es derzeit nicht möglich, ortsbezogene Informationen dem Nutzer zugänglich zu machen. Im Falle von Indoor Navigation muss die App auch passendes Kartenmaterial vom jeweiligen Gebäude bereitstellen. Außerdem muss Bluetooth am Empfangsgerät aktiviert sein, um die Signale der Beacons empfangen zu können.

4.1 Messen

Auf Messen ist der Bedarf eines Einsatzes von digitalen Indoor-Positioning-Services ganz klar gegeben. Messegelände sind zumeist sehr große Areale, auf denen sich die Ausstellungsflächen zumeist über mehrere Hallen verteilen. Für einen Besucher ist es meistens schwierig, sich zu orientieren und die Aussteller zu finden, für die man sich interessiert. Es gibt zwar an ausgewählten Standorten Übersichtspläne, befindet man sich jedoch nicht in der Nähe einer solchen Übersichtskarte, muss man sich oftmals mit Hilfe der mehr oder weniger hilfreichen Wegweisern orientieren. An den Eingängen bekommt man auch Folder mit einer Karte und den einzelnen Ausstellern. Das setzt jedoch voraus,

dass man weiß wo man sich genau befindet und, dass man sich mit Hilfe einer statischen Karte orientieren kann.

4.1.1 Anwendungsmöglichkeiten von Indoor-Positioning-Services

Es gibt mehrere Einsatzmöglichkeiten auf Messen. Eine davon ist die Navigation auf dem Messegelände. Der Besucher soll mit einer App die Möglichkeit haben, seinen aktuellen Standort bestimmen zu können, um zu einem Aussteller oder Messestand seiner Wahl geführt zu werden. Außerdem ist es denkbar, dass der Besucher am Beginn seines Besuches angibt, was ihn besonders interessiert und er bekommt dann mit einem auf ihn angepassten Messeprogramm die Möglichkeit, zu den in Frage kommenden Ausstellern navigiert zu werden.

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit ist, sich rechtzeitig eine Einladung zu Produktvorführungen am Empfangsgerät anzeigen zu lassen und wenn der Benutzer die Vorführung besuchen will, ihn dorthin zu führen.

Am Stand eines Ausstellers besteht zudem die Möglichkeit, zusätzliche Informationen, spezielle Messeangebote oder Visitenkarten des Ausstellers an das Empfangsgerät zu übermitteln.



Abbildung 22 Beispiel einer Navigationsapp für eine Messe (SiT Consult e.K., 2016)

4.1.2 Anforderungen an die Positionsgenauigkeit

Für die Indoor-Navigation auf Messen sollte die Genauigkeit im Bereich von ungefähr 4 Metern liegen, um zu gewährleisten, dass der Benutzer zum gewünschten Messestand geführt wird und Treppen, Durchgänge oder Aufzüge findet.

Für die Bereitstellung von Informationen zu bestimmten Produkten eines Ausstellers ist eine Genauigkeit von mindestens 5 Metern ausreichend. Es genügt, wenn bestimmt werden kann, ob ein Besucher in der Nähe eines Standes ist.

4.2 Museen

In öffentlichen Gebäuden, wie zum Beispiel Museen, ist der Bedarf an Orientierungshilfen auf alle Fälle gegeben. Bis vor wenigen Jahren gab es in Gebäuden nur klassisches

Kartenmaterial oder Wegweiser, die mehr oder weniger nützlich waren und sind. Je größer und unübersichtlicher das Gebäude ist, desto schwieriger ist es, sich darin zu Recht zu finden. Das Bedürfnis nach rascher Orientierung ist durch klassische Orientierungshilfen nicht immer gegeben, vor allem auch, weil wir heutzutage schon gewohnt sind, uns mithilfe von Smartphones oder Tablets komfortabel von Ort zu Ort navigieren zu lassen. Sobald wir aber ein Gebäude betreten, kann das Smartphone oder Tablet seinen Dienst als Orientierungshelfer nicht mehr erfüllen.

4.2.1 Anwendungsmöglichkeiten von Indoor-Positioning-Services

Die Anwendungsmöglichkeiten von Indoor-Positioning-Services in einem Museum sind vielfältig. Mittels einer „Museumsapp“ besteht die Möglichkeit sich zu ausgewählten Ausstellungsobjekten oder Objektgruppen Informationen anzeigen zu lassen, sobald man sich in unmittelbarer Nähe des Objektes befindet. Diese Information kann, zusätzlich zu einer Beschreibung des Objektes, weiterführende Informationen wie Weblinks, Bilder oder Videos enthalten. Außerdem würde das Ausleihen von Audioguides entfallen, da der Besucher sein eigenes Gerät verwenden kann.

Des Weiteren kann die App verschiedene Touren anbieten, die sich nach möglicher Besuchszeit, Fachgebiet oder Alter des Besuchers auswählen lassen. Das App leitet den Benutzer dann auf einer vorgegebenen Route durch das Museum.

Für Schüler oder Junggebliebene wäre es möglich, das Museum spielerisch durch verschiedene Fragestellungen, die es zu beantworten gilt, zu erkunden, ähnlich einer Schnitzeljagd.

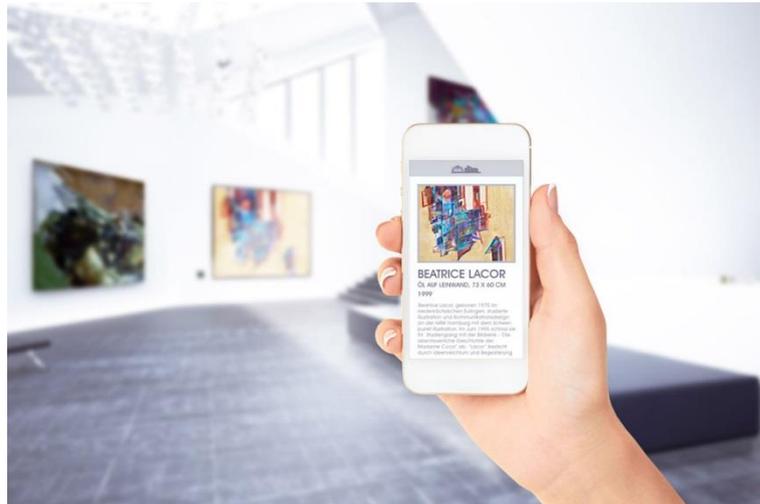


Abbildung 23 Beispiel einer App für ein Museum (Strobel, 2015)

4.2.2 Anforderungen an die Positionsgenauigkeit

Die Anforderungen an die Genauigkeit hängen vom jeweiligen Anwendungsfall ab.

Bei der Anzeige von Informationen zu Objekten reicht die Information, ob sich ein Nutzer in unmittelbarer Nähe zum Objekt befindet. Dafür ist es nicht notwendig, eine exakte Position zu bestimmen, sondern es muss die Distanz auf eine Genauigkeit von 1 bis 3 Metern zum Objekt bestimmt werden.

Anders verhält es sich bei Touren durch das Museum. Hier wird für die Positionsbestimmung eine Genauigkeit von ungefähr 4 Metern benötigt, um dem Nutzer anzeigen zu können, wo er sich gerade befindet, vor welchem Objekt er steht und wohin er weitergehen soll.

Ebenso ist es auch bei einer Schnitzeljagd notwendig die Position des Nutzers zu bestimmen und ihn von Station zu Station zu leiten, wo dann die nächste Frage auf ihn wartet.

4.3 Shoppingcenter bzw. Einzelhandel

Shoppingcenter und der Einzelhandel sind sehr gut für Indoor Positioning-Services geeignet, weshalb der Handel auch unter den ersten Anwendungsgebieten für Indoor-Positioning-Technologien war. In Shoppingcentern gibt es Übersichtskarten, auf denen die Geschäfte eingezeichnet sind und die dem Kunden ihren aktuellen Standort anzeigen. Diese Karten sind allerdings an einem fixen Ort positioniert. Komfortabler ist eine Navigationsapp, mit der ein Kunde zu einem bestimmten Geschäft navigieren kann, wie wir es von einem Navigationsgerät in einem Auto gewohnt sind.

4.3.1 Anwendungsmöglichkeiten von Indoor-Positioning-Services

In Shoppingcentern ist die klassische Navigation ein Thema. Ein Kunde eines Shoppingcenters benötigt Informationen zu seinem aktuellen Standort und wie er zum gewünschten Geschäft kommt. Sobald er dann ein Geschäft betritt, können aktuelle Angebote oder Gutscheine auf dem Empfangsgerät angezeigt werden. Außerdem können Informationen zu einzelnen Produkten, wie verfügbare Größen, Lagerstände oder ähnliches angezeigt werden.

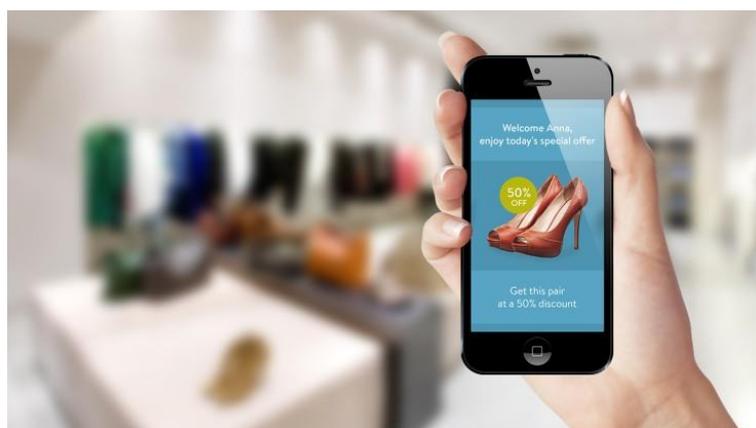


Abbildung 24 Beispiel einer App für ein Geschäft (Bremmer, 2014)

4.3.2 Anforderungen an die Positionsgenauigkeit

Für die Navigation in einem Shoppingcenter muss die aktuelle Position des Kunden festgestellt und ein Weg zum gewünschten Geschäft berechnet werden. Die Positionsgenauigkeit muss in diesem Fall, ähnlich den Anforderungen für ein Navigationsapp auf Messen, auf ungefähr 4 Meter genau sein, um korrektes Navigieren zu ermöglichen.

Um Angebote oder Gutscheine auf einem Empfangsgerät anzuzeigen, sobald ein Kunde ein Geschäft betritt, ist eine Genauigkeit von mindestens 5 Metern ausreichend, da es genügt, das Signal eines Beacons im Eingangsbereich zu empfangen.

Die Anforderung für den Fall der Anzeige von Informationen zu Produkten muss genauer sein, da in Geschäften viele Produkte nah beieinander sein können. Hier muss eine Genauigkeit von mindestens einem Meter gewährleistet sein, um die richtige Information erhalten zu können.

5 Gegenüberstellung der Anwendungsfälle zur Positionsgenauigkeit der Beacons

In diesem Kapitel werde ich die Ergebnisse der Distanzmessung den Anforderungen der Anwendungsfälle gegenüberstellen.

Da sich die Anforderungen an die Genauigkeit bei einigen Anwendungsfällen nicht unterscheiden, werde ich jeweils nur einen Anwendungsfall pro unterschiedlicher Anforderung den Messergebnissen gegenüberstellen.

5.1 Informationen zu einem Messestand

Um Informationen von einem Messestand zu einem Produkt oder einer Firma auf dem Empfangsgerät angezeigt zu bekommen, liegt die Anforderung an die Positionsgenauigkeit bei mindestens 5 Metern. Damit soll gewährleistet sein, dass ein Besucher der Messe, wenn er in die Nähe eines bestimmten Standes kommt, Informationen zu den ausgestellten Produkten oder zur Firma bekommt.

Dazu ist eine exakte Positionsbestimmung nicht nötig. Daher reicht für diesen Anwendungsfall im Minimalfall ein Sender, der am Messestand angebracht wird.

Die Anforderung für die Positionsgenauigkeit wird durch Beacons erfüllt. Die Messungen ergaben bei einer Distanz von 6 Metern eine maximale Abweichung von 2,71 m, die innerhalb der geforderten Genauigkeit liegt.

Aufgrund der Messergebnisse empfiehlt es sich, eine Sendeleistung von 0 dBm und ein Sendeintervall von 1000 ms zu wählen. Durch das Sendeintervall von 1000 ms erhöht sich auch die Batterielebensdauer im Vergleich zur Konfiguration mit den maximalen Einstellungen.

Der Beacon wird am besten in einer Höhe von über 180 cm am Messestand angebracht, um die Störeinflüsse durch Personen zu minimieren, da davon ausgegangen werden kann, dass auf Messen sehr viele Personen sind.

In diesem Fall ist es ausreichend, die Proximity Zonen Immediate, Near und Far von iBeacon zu nutzen. Wenn ein Beacon an einem Messestand angebracht ist, wird die Aktion ausgelöst, sobald sich der Nutzer in der Zone Near befindet.

5.2 Informationen zu einem Ausstellungsstück in einem Museum

Beim Anwendungsfall zusätzliche Informationen zu einem Ausstellungsobjekt in einem Museum anzeigen zu lassen, liegt die Genauigkeitsanforderung bei 1 bis 3 Metern. Es muss gewährleistet sein, dass der Besucher des Museums in unmittelbarer Nähe des Objektes steht, damit er die Informationen zum richtigen Objekt erhält.

Eine exakte Positionsbestimmung ist nicht notwendig, vielmehr ist es ausreichend, zu bestimmen, in welcher Entfernung sich der Besucher zum Ausstellungsstück befindet. Dazu muss ein Sender am oder neben dem Ausstellungsobjekt angebracht werden. Die Anforderung an die Genauigkeit wird durch Beacons erfüllt. Die Messungen in einem Abstand von 3 Metern ergaben eine maximale Abweichung von 2,1 Metern im Versuch mit Störquellen. Im Versuch ohne Störquellen betrug die maximale Abweichung 1,79 Meter. Da davon ausgegangen werden kann, dass sich keine Personen direkt zwischen dem Besucher und dem Objekt befinden, wenn dieser das Ausstellungsstück betrachtet, kann durchaus die Messung ohne Störquellen als Referenz genommen werden.

Die ideale Höhe der Anbringung des Beacons liegt bei 100 cm bis 110 cm, da davon ausgegangen wird, dass sich der Besucher direkt vor dem Objekt befindet, wenn die Informationen angezeigt werden sollen. Für diese Anwendung sind, aufgrund der Messergebnisse, eine Sendeleistung von -12 dBm und ein Sendeintervall von 1000 ms für den Beacon ausreichend.

Auch in diesem Fall ist es ausreichend, die Proximity Zonen Immediate, Near und Far von iBeacon zu nutzen. Wenn ein Beacon an oder neben einem Ausstellungsstück angebracht ist, wird die Aktion ausgelöst, sobald sich ein Besucher in der Zone Immediate (direkt davor) oder Near (in der Nähe) befindet.

5.3 Informationen zu einem Produkt in einem Geschäft

Die Anforderung an die Positionsgenauigkeit um Informationen zu einem Produkt in einem Geschäft anzeigen zu lassen, ist höher als zum Beispiel in Museen, da Artikel in einem Kaufhaus oft sehr nahe nebeneinander sind. Die Genauigkeit sollte zumindest bei einem Meter, besser bei 0,5 Meter, liegen. Wenn sich der Kunde vor einem Produkt befindet und es sich näher ansieht, sollen ihm Zusatzinformationen zu diesem Produkt auf seinem Empfangsgerät angezeigt werden.

Auch in diesem Fall ist eine exakte Positionsbestimmung des Kunden nicht notwendig, da es ausreicht, die Distanz von Sender zu Empfänger zu ermitteln und bei einem bestimmten Schwellenwert die Informationen anzeigen zu lassen. Ein Sender, der am Produkt angebracht wird, reicht aus, um diese Anforderung zu erfüllen. Die Positionsgenauigkeit von Beacons reicht für diesen Anwendungsfall nur bedingt. Bei den Messungen ohne Störquellen (es kann davon ausgegangen werden, dass sich keine anderen Personen zwischen dem Produkt bzw. dem Sender und dem Kunden bzw. dem Empfänger befinden) ergab sich eine maximale Abweichung von 1,79 Meter, was den Anforderungen nicht entspricht. Allerdings verbessert sich die Messgenauigkeit, je näher der Empfänger am Sender ist.

Die Beacons werden direkt am Produkt angebracht, also kann keine einheitliche Höhe für die Anbringung der Beacons angegeben werden. Eine Sendeleistung von -12 dBm und ein Sendeintervall von 1000 ms bei einer Beaconhöhe von 100 cm ergab bei den Messungen eine maximale Abweichung von 0,43 Meter, was über der geforderten Genauigkeit liegt. Daher können diese Parameter als Empfehlung gegeben werden.

Hier empfiehlt es sich wieder, die Proximity Zonen des iBeacon Protokolls zu verwenden. Sobald sich der Kunde in der Zone Immediate befindet (was der Fall ist, wenn der Kunde sich das Produkt näher ansieht oder sogar in die Hand nimmt), werden die Informationen am Empfangsgerät angezeigt.

5.4 Indoor-Navigation

Bei der Navigation innerhalb von Gebäuden ist die Anforderung an die Genauigkeit der Positionsbestimmung im Bereich von 4 Metern. Damit ist gewährleistet, dass der Benutzer zum gewünschten Ziel geführt wird und Treppen, Durchgänge, Aufzüge oder andere markante Punkte findet, die notwendig sind, um ans Ziel zu kommen. Der Nutzer soll seine aktuelle Position auf dem Empfangsgerät angezeigt bekommen und mittels einer Auswahl oder Suche den gewünschten Zielort auswählen können. Anschließend soll eine Route angezeigt werden, die den Nutzer zu seinem gewünschten Ziel führt.

Die Voraussetzung für die Indoor-Navigation ist im Vergleich zu den bisher vorgestellten Anwendungsfällen eine andere. In diesem Fall ist eine exakte Positionsbestimmung notwendig. Dazu muss ein flächendeckendes Netz aus Sendern installiert sein, um die Position des Nutzers jederzeit bestimmen zu können. Eine exakte Positionsbestimmung kann durch eine in Kapitel 2.3 beschriebene Methode durchgeführt werden oder durch eine Kombination aus mehreren Methoden. Davon ausgenommen ist die Methode *Proximity* aus Kapitel 2.3.4, da diese alleinstehend betrachtet, nur die Nähe zu einem Sender bestimmt, nicht aber die exakte Position.

Um eine flächendeckende Abdeckung mit Sendern zu erreichen, macht es Sinn, ausgehend vom Ergebnis der Messungen, die Sender in einer Höhe von zumindest 200 cm zu installieren, um möglichst wenige Störeinflüsse von Personen oder Objekten zu erhalten.

Für eine möglichst hohe Genauigkeit auch in größeren Entfernungen empfiehlt es sich, eine Sendeleistung der Beacons von mindestens 0 dBm und ein Sendeintervall von 500 ms einzustellen, um ein stabiles Signal zu erhalten.

Die Ermittlung einer exakten Positionsbestimmung und in Folge einer Genauigkeitsanalyse geht über den Rahmen dieser Arbeit hinaus.

Ein Projekt der Bayerischen Staatsbibliothek zeigt, dass Beacons für diesen Einsatz geeignet sind. Hier wird eine Kombination aus Triangulation, Proximity und Fingerprinting verwendet, um eine möglichst genaue Positionsbestimmung zu gewährleisten (Ceynowa, 2016, p. 28).

Auch am Hauptbahnhof Zürich ist eine Indoor-Navigationslösung mit Beacons installiert. Die Positionsgenauigkeit beträgt hier zwei bis drei Meter (Gaudlitz, 2015).

Die Beispiele zeigen, dass Beacons geeignet sind, die Anforderungen für ein Navigationssystem in Gebäuden zu erfüllen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit ist eine Evaluierung der Positionsgenauigkeit von Beacons durch Distanzmessungen, die anschließend verschiedenen Anwendungsfällen für Indoor-Positioning-Services gegenübergestellt werden.

Zur Durchführung der Distanzmessungen wurde eine mobile Applikation (App) für das Betriebssystem Android entwickelt, die die Entfernung des Senders zum Empfänger aufgrund der empfangenen Signalstärke berechnet. Die Bluetooth-Low-Energy-Sender, die für die Messungen verwendet wurden, sind von der Firma Estimote.

Es wurden Messungen in einer Entfernung von 3 und 6 Metern durchgeführt, die einmal ohne Störquellen und einmal mit Störquellen (eine Person in direkter Linie zwischen Sender und Empfänger) erfolgten. Neben den unterschiedlichen Entfernungen wurden auch unterschiedliche Parameter der Sender getestet, um die bestmögliche Konfiguration zu bestimmen. Die Sendeleistungen der Beacons betragen -12 dBm, 0 dBm und 4 dBm, die Sendeintervalle lagen bei 500 ms und 1000 ms.

Außerdem wurden die Messungen mit verschiedenen geometrischen Konstellationen durchgeführt. Die Sender wurden hierzu in drei verschiedenen Höhen angebracht (25 cm, 100 cm und 200 cm). Die Messdauer betrug jeweils 10 Sekunden.

Die Ergebnisse der Messungen wurden in Tabellen zusammengefasst und zur Auswertung in Diagrammen dargestellt. Aus den Ergebnissen ließ sich keine eindeutige Aussage treffen, ob eine bestimmte Konfiguration der Beacons die genaueste ist. Dazu gab es zu viele verschiedene Konfigurationen, die bei einzelnen Messreihen das genaueste Ergebnis brachten.

Nach der Diskussion der Messergebnisse wurden Anwendungsfälle für Indoor-Positioning-Services vorgestellt und ihre Anforderungen an die Genauigkeit definiert.

Anschließend wurden die Ergebnisse der Messungen den Anforderungen der Anwendungsfälle gegenübergestellt und überprüft, ob die Anforderungen an die Positionsgenauigkeit erfüllt werden.

Die Antwort auf die Forschungsfrage „Sind Beacons geeignet, die Anforderungen an die Positionsgenauigkeit für die untersuchten Anwendungen zu erfüllen?“, die am Anfang dieser Arbeit gestellt wurde lautet: Beacons sind eine geeignete Technologie, um die untersuchten Anwendungen für Indoor-Positioning-Services zu realisieren. Welche Konfiguration und geometrische Konstellation am besten geeignet ist, lässt sich aber nicht generell beantworten. Zu unterschiedlich sind die verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten und zu unterschiedlich die räumlichen Gegebenheiten.

6.2 Ausblick

Indoor-Location-Based-Services auf Basis von Beacons werden uns im Alltag immer häufiger begegnen. Seit der Einführung dieser Technologie im Jahr 2013 ging die Entwicklung stetig weiter und immer mehr Firmen bieten seither ortsbezogene Indoor-Lösungen mit Beacons an. Die Anwendungsmöglichkeiten gehen auch weit über die in dieser Arbeit vorgestellten hinaus, da der Bedarf an ortsbezogenen Diensten und Inhalten innerhalb von Gebäuden immer mehr gefragt ist.

7 Literaturverzeichnis

Apple, 2014. *Getting Started with iBeacon*. [Online]

Available at: <https://developer.apple.com/ibeacon/Getting-Started-with-iBeacon.pdf>

[Zugriff am 09 08 2016].

Bahl, V. & Padmanabhan, V., 2000. *RADAR: An In-Building RF-based User Location and Tracking System*. [Online]

Available at: <https://www.microsoft.com/en-us/research/wp-content/uploads/2016/02/infocom2000.pdf>

[Zugriff am 22 08 2016].

Beaconinside GmbH, 2016. *Beaconinside Beacon*. [Online]

Available at: <https://www.beaconinside.com/>

[Zugriff am 25 10 2016].

Bluetooth SIG, 2016. *Bluetooth SIG*. [Online]

Available at: <https://www.bluetooth.com/what-is-bluetooth-technology/bluetooth>

[Zugriff am 07 08 2016].

Borowicz, W., 2015. *How precise are Estimote Beacons?*. [Online]

Available at: <https://community.estimote.com/hc/en-us/articles/201302836-How-precise-are-Estimote-Beacons->

[Zugriff am 11 11 2016].

Bremmer, M., 2014. *Nahfunktechnik mit Startproblemen: (i)Beacons funken in Deutschland noch im Nebel - computerwoche.de*. [Online]

Available at: <http://www.computerwoche.de/a/i-beacons-funken-in-deutschland-noch-im-nebel,2557597>

[Zugriff am 22 11 2016].

Ceynowa, K., 2016. „Leuchtfeuer“ in der Bibliothek – Beacons-Technologie zur Indoor-Navigation in der Bayerischen Staatsbibliothek. *BIBLIOTHEK – Forschung und Praxis*, 04, pp. 26-32.

Deyhle, R., 2012. *sprachkonstrukt.de*. [Online]

Available at: http://sprachkonstrukt.de/files/2012/08/deyhle_bluetooth4.pdf

[Zugriff am 07 08 2016].

Estimote, 2012-2016. *Estimote*. [Online]

Available at: <http://estimote.com/>

[Zugriff am 19 08 2016].

- Estimote, 2014. *Developer Docs*. [Online]
Available at: <http://developer.estimote.com/>
[Zugriff am 09 08 2016].
- Gaudlitz, E., 2015. *Mit Indoor-Navigation zum richtigen Gleis am Zürich Hauptbahnhof*. [Online]
Available at: <https://www.infsoft.de/unternehmen/presse/articleid/99/indoor-navigation-am-zuerich-hauptbahnhof>
[Zugriff am 12 09 2016].
- Google, 2016. *Eddystone Ephemeral Identifier | Beacons*. [Online]
Available at: <https://developers.google.com/beacons/eddystone-eid>
[Zugriff am 19 11 2016].
- Gupta, N., 2013. *Inside Bluetooth Low Energy*. s.l.:Artech House.
- Haartsen, J., 1998. *Department of Computing Science*. [Online]
Available at: <https://www8.cs.umu.se/kurser/TDBD16/VT07/bluetooth.pdf>
[Zugriff am 07 08 2016].
- Hughes, C. F., 2014. *ASU Digital Repository*. [Online]
Available at:
https://repository.asu.edu/attachments/163965/content/Hughes_asu_0010N_15636.pdf
[Zugriff am 09 08 2016].
- Küpper, A., 2005. *Location-Based Services: Fundamentals and Operation*. Chichester: John Wiley & Sons.
- Maier, D., 2014. *Bluetooth Low Energy - Introducing iBeacon*. [Online]
Available at:
<http://www6.in.tum.de/pub/Main/TeachingWs2014ProseminarMicrocontrollerEmbedded/iBeacon.pdf>
[Zugriff am 09 08 2016].
- Mautz, R., 2012. *ETH E-Collection Indoor Positioning Technologies*. [Online]
Available at: <http://e-collection.library.ethz.ch/view/eth:5659>
[Zugriff am 22 08 2016].
- Meng, W., Xie, L., Ni, W. & Xia, W., 2011. *Secure and Robust Wi-Fi Fingerprinting Indoor Localization*. [Online]
Available at: http://ipin2011.dsi.uminho.pt/PDFs/Shortpaper/65_Short_Paper.pdf
[Zugriff am 30 09 2016].
- Schiller, J. & Voisard, A., 2004. *Location-Based Services*. 1. Hrsg. San Francisco: Elsevier.

Schneider Schreibgeräte GmbH, 2016. *blukii. Wearables, Beacons, Sensors & Tags.*

[Online]

Available at: <http://www.blukii.com/index.html>

[Zugriff am 12 10 2016].

SiT Consult e.K., 2016. *Branchenlösung Messen.* [Online]

Available at: <http://www.sitconsult.com/index.php?id=60>

[Zugriff am 22 11 2016].

Strang, T., 2008. *Lokalisierungsverfahren.* Neustrelitz , Braunschweig , Oberpfaffenhofen:
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR).

Strobel, C., 2015. *Beacon-Technologie: Das große Ding der kleinen Dinger.* [Online]

Available at: <http://www.techtag.de/it-und-hightech/warum-2015-das-jahr-der-ibeacons-wird/>

[Zugriff am 22 11 2016].

Werner, M., 2014. *Indoor Location-Based Services.* 1. Hrsg. Schweiz: Springer.

8 Anhang

8.1 Tabellen mit den gemessenen Werten ohne Störquellen

Distanz: 3 Meter
 Sendeintervall: 500 ms
 Messdauer: 10 s

Höhe des Beacon: 25 cm			
Signalstärke in dBm	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
gemessene Werte in m	1,41	1,56	3,82
	1,41	1,56	3,82
	1,41	1,56	3,82
	1,62	1,56	3,38
	1,62	1,56	3,38
	1,62	1,56	3,38
	1,62	1,56	3,38
	1,67	1,56	3,38
	1,67	1,56	2,93
	1,67	1,56	2,93
	1,67	1,70	2,93
	1,85	1,70	2,93
	1,85	1,70	2,80
	1,85	1,70	2,80
	1,85	1,70	2,80
	1,85	1,70	2,80
	1,67	1,70	2,80
	1,67	1,70	4,40
	1,67	1,70	4,40
	1,67	1,70	4,40
Mittelwert:	1,67	1,63	3,36
Median:	1,67	1,63	3,38
Abweichung Mittelwert	-1,33	-1,37	0,36
Abweichung Median	-1,33	-1,37	0,38

Höhe des Beacon: 100 cm			
Signalstärke in dBm	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
gemessene Werte in m	3,91	4,43	6,14
	3,91	4,43	6,14
	3,91	4,43	6,14

	3,91	4,43	5,67
	4,99	4,43	5,67
	4,99	4,79	5,67
	4,99	4,79	5,67
	4,01	4,79	5,10
	4,01	4,79	5,10
	4,01	4,79	4,57
	4,01	6,05	4,57
	3,43	6,05	4,57
	3,43	6,05	4,57
	3,43	13,13	3,82
	3,43	13,13	3,82
	3,43	15,38	3,82
	3,91	15,38	3,82
	3,91	15,38	4,21
	3,91	16,86	4,21
	3,91	16,86	4,21
Mittelwert:	3,97	8,52	4,87
Median:	3,91	5,42	4,57
Abweichung Mittelwert	0,97	5,52	1,87
Abweichung Median	0,91	2,42	1,57

Höhe des Beacon: 200 cm			
Signalstärke in dBm	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
gemessene Werte in m	1,85	2,20	2,93
	1,85	2,20	2,93
	1,85	2,20	2,93
	1,85	2,30	2,93
	1,67	2,30	2,93
	1,67	2,30	2,80
	1,67	2,30	2,80
	1,62	4,57	2,80
	1,62	4,57	2,80
	1,62	4,57	2,40
	1,67	4,57	2,40
	1,67	2,57	2,40
	1,67	2,57	2,40
	1,62	2,57	2,80
	1,62	2,57	2,80
	1,62	2,57	2,40
	1,67	2,57	2,40
	1,67	2,30	2,93

	1,67	2,30	2,93
	1,67	2,30	2,93
Mittelwert:	1,69	2,82	2,73
Median:	1,67	2,44	2,80
Abweichung Mittelwert	-1,31	-0,18	-0,27
Abweichung Median	-1,33	-0,57	-0,20

neu

Höhe des Beacon: 100 cm			
Signalstärke in dBm	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
gemessene Werte in m			
	3,91	2,30	6,14
	3,91	2,30	6,14
	3,91	2,20	6,14
	3,91	1,89	5,67
	4,99	1,89	5,67
	4,99	2,30	5,67
	4,99	2,30	5,67
	4,01	2,30	5,10
	4,01	2,30	5,10
	4,01	2,30	4,57
	4,01	2,30	4,57
	3,43	2,30	4,57
	3,43	2,30	4,57
	3,43	2,30	3,82
	3,43	1,89	3,82
	3,43	1,89	3,82
	3,91	1,70	3,82
	3,91	1,70	4,21
	3,91	1,56	4,21
	3,91	1,56	4,21
Mittelwert:	3,97	2,08	4,87
Median:	3,91	2,30	4,57
Abweichung Mittelwert	0,97	-0,92	1,87
Abweichung Median	0,91	-0,70	1,57

Distanz: 3 Meter
 Sendeintervall: 1000 ms
 Messdauer: 10 s

Höhe des Beacon: 25 cm			
Signalstärke in dBm	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
gemessene Werte in m	3,91	2,30	1,98
	3,91	2,30	2,17
	4,01	2,30	2,17
	4,01	2,57	1,98
	4,01	2,57	1,98
	4,38	2,57	2,17
	4,38	2,57	2,17
	4,38	2,57	2,17
	4,38	2,30	2,40
	4,38	2,30	2,40
Mittelwert:	4,18	2,44	2,16
Median:	4,20	2,44	2,17
Abweichung Mittelwert	1,18	-0,57	-0,84
Abweichung Median	1,20	-0,57	-0,83

Höhe des Beacon: 100 cm			
Signalstärke in dBm	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
gemessene Werte in m	4,01	5,24	4,21
	3,91	4,43	4,21
	3,91	2,57	4,21
	3,43	3,57	3,82
	3,43	4,79	3,82
	3,17	4,79	3,82
	2,97	4,79	3,82
	2,97	6,26	3,82
	3,43	6,26	3,82
	3,43	7,98	3,82
Mittelwert:	3,47	5,07	3,94
Median:	3,43	4,79	3,82
Abweichung Mittelwert	0,47	2,07	0,94
Abweichung Median	0,43	1,79	0,82

Höhe des Beacon: 200 cm			
Signalstärke in dBm	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
gemessene Werte in m	4,01	1,89	4,21
	3,91	1,70	2,80
	3,91	1,70	2,17

	4,38	1,89	2,17
	4,38	1,89	1,98
	3,43	1,89	1,56
	2,70	2,20	1,56
	2,70	2,20	1,42
	2,46	2,57	1,28
	2,46	2,57	1,56
Mittelwert:	3,43	2,05	2,07
Median:	3,67	1,89	1,77
Abweichung Mittelwert	0,43	-0,95	-0,93
Abweichung Median	0,67	-1,11	-1,23

Distanz: 6 Meter
Sendeintervall: 500 ms
Messdauer: 10 s

Höhe des Beacon: 25 cm			
Signalstärke in dBm	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
gemessene Werte in m	4,99	5,24	8,90
	4,99	5,24	8,90
	4,99	5,24	8,90
	4,99	5,24	8,90
	5,72	5,24	7,76
	5,72	5,24	7,76
	5,72	4,43	7,76
	5,38	4,43	6,14
	5,38	4,43	6,14
	5,38	4,43	6,14
	5,72	4,43	6,14
	5,72	4,43	5,67
	5,72	4,79	5,67
	5,38	4,79	6,14
	5,38	4,79	6,14
	5,38	4,79	6,14
	4,99	4,43	6,72
	4,99	4,43	6,72
	4,99	4,43	6,72
	4,99	4,43	6,72
Mittelwert:	5,33	4,75	7,00
Median:	5,38	4,61	6,72
Abweichung Mittelwert	-0,67	-1,26	1,00
Abweichung Median	-0,62	-1,39	0,72

Höhe des Beacon: 100 cm			
Signalstärke in dBm	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
gemessene Werte in m	4,79	19,22	7,76
	4,79	19,22	7,76
	4,79	12,12	7,76
	4,79	12,12	11,99
	4,79	7,98	11,99
	4,79	7,98	15,57
	4,79	7,98	15,57
	4,79	7,98	16,88
	4,79	6,26	16,88
	4,99	6,26	16,88
	4,99	6,26	19,29
	4,99	6,26	19,29
	4,99	6,05	19,29
	4,99	6,05	15,57
	4,99	6,05	15,57
	4,99	6,05	15,57
	4,99	4,43	10,24
	4,99	4,43	10,24
	4,99	4,43	10,24
	4,99	4,43	10,24
Mittelwert:	4,90	8,08	13,73
Median:	4,99	6,26	15,57
Abweichung Mittelwert	-1,10	2,08	7,73
Abweichung Median	-1,01	0,26	9,57

Höhe des Beacon: 200 cm			
Signalstärke in dBm	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
gemessene Werte in m	3,91	4,79	5,67
	3,91	4,79	5,67
	3,91	4,79	5,67
	3,91	4,79	6,14
	3,91	4,43	6,14
	3,91	4,43	6,14
	3,43	4,43	6,14
	3,43	4,43	6,14
	3,43	3,98	6,14
	3,43	3,98	6,14
	3,91	3,98	6,14
	3,91	3,98	6,14
	3,91	4,43	6,14

	3,91	4,43	6,14
	3,91	4,43	6,14
	3,91	4,79	6,14
	3,43	4,79	7,76
	3,43	5,24	7,76
	3,43	5,24	7,76
	3,43	5,24	7,76
Mittelwert:	3,72	4,57	6,39
Median:	3,91	4,43	6,14
Abweichung Mittelwert	-2,28	-1,43	0,39
Abweichung Median	-2,09	-1,57	0,14

	neu	neu	
Höhe des Beacon: 100 cm			
Signalstärke in dBm	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
gemessene Werte in m	4,79	2,20	5,67
	4,79	2,20	5,67
	4,79	2,20	6,14
	4,79	2,20	6,14
	4,79	2,20	6,72
	4,79	2,20	6,72
	4,79	2,20	4,57
	4,79	2,30	4,57
	4,79	2,30	4,57
	4,99	2,30	4,57
	4,99	2,30	3,28
	4,99	2,30	3,28
	4,99	2,20	3,82
	4,99	2,20	4,21
	4,99	1,89	4,21
	4,99	1,89	4,21
	4,99	1,89	5,10
	4,99	1,89	5,10
	4,99	1,70	8,04
	4,99	1,70	8,04
Mittelwert:	4,90	2,11	5,23
Median:	4,99	2,20	4,84
Abweichung Mittelwert	-1,10	-3,89	-0,77
Abweichung Median	-1,01	-3,80	-1,17

Distanz: 6 Meter
 Sendeintervall: 1000 ms
 Messdauer: 10 s

Höhe des Beacon: 25 cm			
Signalstärke in dBm	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
gemessene Werte in m	3,91	6,93	3,82
	4,01	6,93	3,82
	4,01	6,93	3,82
	4,99	6,93	3,28
	5,38	6,93	3,28
	5,38	10,28	2,80
	4,38	10,28	2,80
	3,91	10,28	2,40
	3,43	12,12	2,40
	3,43	12,12	2,40
Mittelwert:	4,28	8,97	3,08
Median:	4,01	8,61	3,04
Abweichung Mittelwert	-1,72	2,97	-2,92
Abweichung Median	-1,99	2,61	-2,96

Höhe des Beacon: 100 cm			
Signalstärke in dBm	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
gemessene Werte in m	3,91	6,26	4,21
	7,21	6,26	4,21
	7,21	6,05	3,28
	6,24	5,24	3,28
	6,24	5,24	2,93
	6,24	4,79	2,80
	6,24	4,79	2,80
	6,24	6,05	2,40
	6,24	6,24	2,40
	6,24	6,24	2,17
Mittelwert:	6,20	5,72	3,05
Median:	6,24	6,05	2,87
Abweichung Mittelwert	0,20	-0,28	-2,95
Abweichung Median	0,24	0,05	-3,14

Höhe des Beacon: 200 cm			
Signalstärke in dBm	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
gemessene Werte in m	4,01	4,43	3,82
	3,91	4,79	3,82
	3,91	4,79	3,82

	3,43	4,43	3,28
	3,17	4,43	3,28
	3,43	4,43	3,82
	3,43	4,43	3,82
	3,43	4,43	3,82
	3,43	4,43	3,28
	3,91	4,43	3,28
Mittelwert:	3,61	4,50	3,60
Median:	3,43	4,43	3,82
Abweichung Mittelwert	-2,39	-1,50	-2,40
Abweichung Median	-2,57	-1,57	-2,18

neu

Höhe des Beacon: 25 cm			
Signalstärke in dBm	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
gemessene Werte in m	3,91	5,24	3,82
	4,01	4,79	3,82
	4,01	4,43	3,82
	4,99	4,79	3,28
	5,38	5,24	3,28
	5,38	5,24	2,80
	4,38	5,24	2,80
	3,91	5,24	2,40
	3,43	6,26	2,40
	3,43	7,98	2,40
Mittelwert:	4,28	5,45	3,08
Median:	4,01	5,24	3,04
Abweichung Mittelwert	-1,72	-0,56	-2,92
Abweichung Median	-1,99	-0,76	-2,96

8.2 Tabellen mit den gemessenen Werten mit Störquellen

Distanz: 3 Meter
 Sendeintervall: 500 ms
 Messdauer: 10 s

Höhe des Beacon: 25 cm			
Signalstärke in dBm	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
gemessene Werte in m	1,62	1,70	1,98
	1,62	1,70	1,98
	1,62	2,20	1,98
	1,85	2,20	1,98
	1,85	1,70	1,98
	1,85	1,70	1,98
	1,85	1,56	2,80
	1,85	1,56	2,80
	1,85	1,56	2,80
	1,85	1,56	2,80
	1,85	1,56	4,57
	1,85	1,70	4,57
	1,85	1,70	5,10
	1,85	2,20	5,10
	1,85	2,20	5,10
	1,85	2,57	7,76
	1,67	2,57	7,76
	1,67	3,29	5,10
	1,67	3,29	2,93
	1,67	3,29	2,93
Mittelwert:	1,78	2,09	3,70
Median:	1,85	1,70	2,87
Abweichung Mittelwert	-1,22	-0,91	0,70
Abweichung Median	-1,15	-1,30	-0,14

Höhe des Beacon: 100 cm			
Signalstärke in dBm	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
gemessene Werte in m	3,17	2,57	5,10
	3,17	2,57	5,10
	2,46	2,57	4,57
	2,46	3,57	4,57
	1,85	3,57	4,57
	1,85	3,57	4,57
	1,67	3,57	3,82

	1,30	3,29	3,82
	1,30	3,29	3,82
	1,30	3,29	3,82
	1,09	3,98	2,80
	1,09	3,98	2,80
	1,09	3,98	2,80
	1,41	3,98	2,80
	1,41	3,98	2,80
	1,85	3,98	2,80
	1,85	3,98	2,93
	1,85	3,98	2,93
	1,85	3,98	3,28
	1,85	3,98	3,28
Mittelwert:	1,79	3,58	3,65
Median:	1,85	3,78	3,55
Abweichung Mittelwert	-1,21	0,58	0,65
Abweichung Median	-1,15	0,78	0,55

Höhe des Beacon: 200 cm			
Signalstärke in dBm	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
gemessene Werte in m	1,21	1,70	1,42
	1,21	1,70	1,42
	1,09	2,20	1,42
	1,09	2,20	1,28
	1,41	2,99	1,28
	1,41	2,99	1,28
	1,67	3,57	1,42
	1,67	3,57	1,42
	1,85	2,30	1,42
	1,85	2,30	1,42
	1,85	1,70	1,56
	1,85	1,70	1,56
	1,85	1,39	1,56
	1,67	1,39	1,56
	1,67	1,24	1,98
	1,67	1,24	1,98
	1,67	1,01	1,98
	1,67	1,01	1,98
	1,67	1,01	1,98
	1,67	1,01	1,76
Mittelwert:	1,59	1,91	1,58
Median:	1,67	1,70	1,49

Abweichung Mittelwert	-1,42	-1,09	-1,42
Abweichung Median	-1,33	-1,30	-1,51

Distanz: 3 Meter
Sendeintervall: 1000 ms
Messdauer: 10 s

Höhe des Beacon: 25 cm			
Signalstärke in dBm	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
gemessene Werte in m	1,62	2,99	2,93
	2,46	2,30	2,40
	2,46	1,70	1,96
	2,46	1,70	1,56
	2,30	1,70	1,28
	2,30	2,30	1,56
	2,30	3,30	1,76
	2,12	2,20	1,76
	2,12	2,20	1,76
	2,70	2,20	1,76
Mittelwert:	2,28	2,26	1,87
Median:	2,30	2,20	1,76
Abweichung Mittelwert	-0,72	-0,74	-1,13
Abweichung Median	-0,70	-0,80	-1,24

Höhe des Beacon: 100 cm			
Signalstärke in dBm	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
gemessene Werte in m	1,41	2,30	4,57
	1,30	4,79	6,14
	2,12	6,05	5,67
	2,97	6,26	2,40
	3,43	5,24	2,40
	2,91	4,73	2,40
	4,99	3,57	1,76
	6,24	3,57	1,76
	5,72	3,57	1,76
	5,72	3,57	1,56
Mittelwert:	3,68	4,37	3,04
Median:	3,20	4,15	2,40
Abweichung Mittelwert	0,68	1,37	0,04
Abweichung Median	0,20	1,15	-0,60

Höhe des Beacon: 200 cm			
Signalstärke in dBm	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
gemessene Werte in m	1,67	2,30	3,28
	1,62	1,70	2,80
	1,62	3,57	3,28
	1,41	4,79	5,10
	1,62	7,13	6,14
	1,85	6,05	6,14
	1,85	3,98	5,10
	1,85	3,29	5,10
	1,62	3,29	5,67
	1,41	2,99	4,21
Mittelwert:	1,65	3,91	4,68
Median:	1,62	3,43	5,10
Abweichung Mittelwert	-1,35	0,91	1,68
Abweichung Median	-1,38	0,43	2,10

Distanz: 6 Meter
 Sendeintervall: 500 ms
 Messdauer: 10 s

Höhe des Beacon: 25 cm			
Signalstärke in dBm	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
gemessene Werte in m	3,91	6,93	5,67
	3,91	6,93	5,67
	4,99	6,26	5,10
	4,99	6,26	5,10
	4,99	6,26	5,67
	4,99	6,26	5,67
	4,99	6,26	5,67
	4,99	6,26	5,67
	3,91	6,26	6,72
	3,91	6,26	6,72
	3,91	6,26	10,24
	3,91	6,26	10,24
	3,43	6,26	11,16
	3,43	6,26	11,16
	4,10	6,26	10,24
	4,10	5,24	10,24
	4,99	5,24	8,90
	4,99	4,43	8,90
	4,99	4,43	8,04
	4,99	4,43	8,04

Mittelwert:	4,42	5,95	7,74
Median:	4,55	6,26	7,38
Abweichung Mittelwert	-1,58	-0,05	1,74
Abweichung Median	-1,46	0,26	1,38

Höhe des Beacon: 100 cm			
Signalstärke in dBm	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
gemessene Werte in m	4,99	8,69	5,10
	4,99	8,69	5,10
	4,38	8,69	6,14
	4,38	8,69	6,14
	4,99	7,98	6,72
	4,99	7,98	7,76
	4,38	6,93	7,76
	4,38	6,93	8,04
	3,91	6,05	8,04
	3,91	6,05	8,90
	3,17	5,26	8,90
	3,17	5,26	7,76
	3,17	4,79	7,76
	3,17	4,79	7,76
	3,17	4,79	7,76
	3,17	4,79	6,72
	2,97	4,79	6,72
	2,97	4,79	7,76
	2,97	4,79	7,76
	2,97	9,33	7,76
Mittelwert:	3,81	6,50	7,32
Median:	3,54	6,05	7,76
Abweichung Mittelwert	-2,19	0,50	1,32
Abweichung Median	-2,46	0,05	1,76

Höhe des Beacon: 200 cm			
Signalstärke in dBm	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
gemessene Werte in m	4,38	2,99	5,67
	7,38	2,99	5,67
	4,01	3,29	7,76
	4,01	3,29	8,04
	4,01	3,29	6,72
	4,38	3,29	6,72
	4,99	3,29	6,72
	4,99	3,29	6,14

	4,39	3,29	6,14
	4,39	3,29	5,67
	4,39	3,29	5,67
	4,39	3,29	5,10
	4,01	3,57	5,10
	4,01	3,57	5,67
	3,43	3,57	5,67
	3,43	3,57	5,10
	3,17	3,57	5,10
	3,17	3,57	5,10
	2,97	3,98	5,10
	2,97	3,98	5,10
Mittelwert:	4,14	3,41	5,90
Median:	4,01	3,29	5,67
Abweichung Mittelwert	-1,86	-2,59	-0,10
Abweichung Median	-1,99	-2,71	-0,33

Distanz: 6 Meter
Sendeintervall: 1000 ms
Messdauer: 10 s

Höhe des Beacon: 25 cm			
Signalstärke in dBm	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
gemessene Werte in m	3,43	8,69	2,40
	3,17	6,93	2,80
	4,01	6,93	2,93
	4,38	6,93	3,28
	4,38	6,05	4,21
	4,38	8,69	4,57
	4,38	9,33	4,57
	4,38	9,33	4,57
	4,99	8,69	4,57
	5,38	8,69	4,21
Mittelwert:	4,29	8,03	3,81
Median:	4,38	8,69	4,21
Abweichung Mittelwert	-1,71	2,03	-2,19
Abweichung Median	-1,62	2,69	-1,79

Höhe des Beacon: 100 cm			
Signalstärke in dBm	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
gemessene Werte in m	4,38	8,69	7,76
	5,38	9,33	6,72
	5,38	8,69	7,76

	5,38	6,36	8,04
	5,72	6,36	8,04
	5,72	5,24	8,04
	5,72	6,06	6,72
	5,72	5,24	6,72
	5,72	5,24	6,72
	4,38	5,24	6,72
Mittelwert:	5,35	6,65	7,32
Median:	5,55	6,21	7,24
Abweichung Mittelwert	-0,65	0,65	1,32
Abweichung Median	-0,45	0,21	1,24

Höhe des Beacon: 200 cm			
Signalstärke in dBm	-12 dBm	0 dBm	4 dBm
gemessene Werte in m	2,30	2,30	6,72
	2,30	2,30	6,14
	2,30	2,99	6,14
	2,70	4,79	6,14
	3,43	6,26	6,14
	3,17	6,93	6,14
	3,43	8,26	6,14
	3,43	8,93	4,21
	3,43	6,26	4,21
	3,43	5,24	2,93
Mittelwert:	2,99	5,43	5,49
Median:	3,30	5,75	6,14
Abweichung Mittelwert	-3,01	-0,57	-0,51
Abweichung Median	-2,70	-0,25	0,14