



Christoph Friedrich, BSc

Positionsbestimmung von Fahrzeugen in Tiefgaragen - Entwurf und Implementierung basierend auf IEEE 802.11 Wireless LAN

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur
Masterstudium Telematik

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer:

Ass.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Christian Steger
Institut für Technische Informatik
Technische Universität Graz

Graz, im Mai 2015

Abstract

The goal of this work is a localization system for vehicles in an underground garage environment. The subterranean localization of buses and tramways of a local transport company poses a big challenge for the current techniques. There are existing different radio-based methods but they are only realizable with huge efforts in terms of costs and changes in the infrastructure.

This diploma thesis is generated under a collaboration with the Municipal Transport Services in Innsbruck (IVB). During the concept a special focus is given on the integration of already existing resources. For example an area-wide network coverage by wireless LAN for already existing subsystems of the depotmanagement is indispensable.

In the first step the calculation of the position by IEEE 802.11 WLAN is done by the *cell of origin* method. This enables vehicles to be localized with a high reliability but only at relatively inexact positions. More precise results can be achieved by the use of the *fingerprinting* method. In the initialization phase a topographical survey of the area is executed and the measured data is added to the software. During the localization process the automatic retrieval for the signal strengths is taking place via SNMP protocol.

Even without using complex statistical methods, almost satisfactory positioning results can be achieved already. An analysis shows that accuracy depends on many parameters, e.g. the quality of the reference data or the reliability of the used standard hardware. For the improvement of the results, different redundancies come into operation, e.g. at the access points or at the particular WLAN devices of the vehicles.

The modular design of the implemented localization system allows a sufficiently high resolution of the position of all vehicles in the underground garage with the use of standard hardware.

Kurzfassung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Positionsbestimmung von Fahrzeugen in Tiefgaragen. Die unterirdische Ortung von Bussen und Straßenbahnen eines ÖPNV-Unternehmens auf dem Betriebshofgelände stellt gegenwärtig eine Herausforderung an die Technik dar. Unterschiedliche funkbasierende Lösungsansätze existieren, sind aber nur mit großen infrastrukturellen und finanziellen Aufwendungen realisierbar.

Diese Masterarbeit wird in Zusammenarbeit mit den Innsbrucker Verkehrsbetrieben erstellt. Bereits beim Konzept wird auf die Integration bestehender Ressourcen Rücksicht genommen. So ist eine flächendeckende Netzwerkversorgung mittels Wireless LAN für bereits vorhandene Subsysteme des Betriebshofmanagements unabdingbar.

Die Positionsbestimmung mittels IEEE 802.11 WLAN erfolgt im ersten Schritt durch die *Cell Of Origin* Methode, wodurch Fahrzeuge mit hoher Zuverlässigkeit einer relativ ungenauen Position zugeordnet werden können. Präzisere Ergebnisse lassen sich mittels *Fingerprinting* realisieren. In der Initialisierungsphase erfolgt die Vermessung des Areal und die softwareseitige Einpflegung der Messdaten. Während der Lokalisierung findet die automatische Abfrage der einzelnen Signalstärken mittels SNMP Protokoll statt.

Ohne Anwendung komplexer statistischer Methoden können bereits annähernd zufriedenstellende Ortungsergebnisse erreicht werden. Eine Analyse zeigt, dass die Genauigkeit von mehreren Faktoren beeinflusst wird, darunter die Qualität der Referenzdaten aber auch die Zuverlässigkeit der eingesetzten Standard-Hardware. Zur Verbesserung der Ortungsergebnisse kommen verschiedene Redundanzen zum Einsatz, zum Beispiel bei den Access Points oder auch bei den WLAN-Geräten der Fahrzeuge.

Das modulare Design des präsentierten Lokalisierungssystems erlaubt durch den Einsatz von standardmäßiger Hardware eine ausreichend auflösende Position aller Fahrzeuge in einer Tiefgarage.

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

.....
Graz, am

.....
Christoph Friedrich

Danksagung

Diese Masterarbeit wurde am Institut für Technische Informatik der Technischen Universität Graz unter der Leitung von Univ.-Prof. Dipl.-Inform. Dr.sc. Kay Uwe Römer durchgeführt.

An erster Stelle möchte ich mich bei Herrn Ass.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christian Steger bedanken. Von Beginn an hat er diese Arbeit mit seinem persönlichen und fachlichen Engagement unterstützt sowie mit seinen Ideen und auch Kontakten maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Bei den Innsbrucker Verkehrsbetrieben möchte ich mich allen voran beim Geschäftsführer Herrn DI Martin Baltes für die Möglichkeit der äußerst konstruktiven Zusammenarbeit zwischen Theorie und Praxis sehr herzlich bedanken.

Besonderer Dank gilt auch dem Telematik/IT Abteilungsleiter Herrn Alfred Platzer. Über Jahre hinweg gab er mir die Möglichkeit, in einem interessanten Unternehmensumfeld zu wachsen und neue Ideen und Projekte umzusetzen. Den Abschluss meiner Studienzzeit mit diesem Projekt zu verwirklichen freut mich deshalb ganz besonders.

Meinen Freundeskreis in Graz sehe ich als Hauptverantwortlichen für meine ausgedehnte Studiendauer. Stets anfällig für neue Projekte und Gelegenheiten bin ich aber jedem Einzelnen meiner Freunde dafür dankbar, mich in regelmäßigen Abständen daran erinnert zu haben, dass Studieren nicht nur Mindeststudienzeit bedeutet, sondern dass Ideen verwirklicht und Interessen und Visionen gelebt werden sollen.

Der größte Dank gilt meiner Familie. Meinen Eltern danke ich dafür, dass sie mich über all die Jahre meines Studiums, sowie in meinen Projekten und persönlichen Reifungsprozessen sehr geduldig unterstützt haben. Ihnen und auch meinen beiden Schwestern verdanke ich durch Ihre unermüdliche Motivation und dem stetigen Nachfragen bezüglich meines Studienfortschritts den Abschluss meines Telematik Studiums.

Graz, im Mai 2015

Christoph Friedrich

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	8
Tabellenverzeichnis	9
Abkürzungsverzeichnis	10
1 Einleitung	12
1.1 Motivation	13
1.2 Aufbau	14
2 Grundlagen	15
2.1 Lokalisierungssysteme	15
2.1.1 Absolute und relative Lokalisierung	15
2.1.2 Genauigkeit und Reichweite	16
2.1.3 Selbststörung und Fernortung	16
2.1.4 Koordinatensystem	16
2.2 Verfahren und Techniken der Positionsbestimmung	16
2.2.1 Received Signal Strength Indication	17
2.2.2 Triangulation und Trilateration	17
2.2.3 Time of Arrival	18
2.2.4 Time Difference of Arrival	18
2.2.5 Angle of Arrival	18
2.2.6 Cell of Origin	19
2.2.7 Fingerprinting	19
2.3 Wireless Local Area Network	20
2.3.1 Definition	20
2.3.2 Frequenzbänder und Kanäle	20
2.3.3 Standards nach IEEE 802.11	21
2.3.4 Kompatibilitäten	22
2.3.5 Maximal zulässige Sende- bzw. Strahlungsleistungen	22
2.4 Simple Network Management Protocol	22
2.4.1 Aufbau und Module	23
2.4.2 Kommunikation	24
2.5 Wireless LAN Site Survey	25

2.6	Betriebshofmanagement	26
2.7	Referenzprojekte	26
2.8	Zusammenfassung	28
3	Design	29
3.1	Analyse Betriebshof Innsbrucker Verkehrsbetriebe	29
3.1.1	Fuhrpark und Betriebshof	30
3.1.2	Kommunikation	32
3.1.3	Benutzer und Anwendungen	33
3.2	Aufbau und Konzept	34
3.3	Ortungungsverfahren	37
3.3.1	Cell of Origin	38
3.3.2	Triangulation mittels Received Signal Strength Indication	39
3.3.3	Fingerprinting	41
3.4	Initialisierungsphase	42
3.5	Lokalisierungsphase	42
3.5.1	Kommunikation	43
3.5.2	Fetcher	43
3.5.3	DataCruncher	45
3.5.4	Betriebshofmanagement	48
3.6	Zusammenfassung	50
4	Implementierung	51
4.1	Ablauf	51
4.2	Laufzeitumgebung	52
4.2.1	Soft- und Hardwareumgebung	52
4.2.2	Tiefgarage	52
4.2.3	Fahrzeuge	54
4.3	WLAN Site Survey	55
4.3.1	Erste Messversuche	58
4.3.2	Messung mit zwei Access Points	61
4.3.3	Messung mit sechs Access Points	62
4.3.4	Messung mit acht Access Points	63
4.3.5	Zusammenfassung der Messergebnisse	64
4.4	SNMP Kommunikation	65
4.5	Positionsbestimmung	66
4.5.1	SNMP Fetcher	66
4.5.2	DataCruncher	66
4.5.3	Cell of Origin	67
4.5.4	Fingerprinting	67
4.6	Betriebshofmanagement	68
4.6.1	Integration	68
4.6.2	Ausgabe	69
4.7	Zusammenfassung	70

5	Evaluierung und Tests	73
5.1	Testumgebung	73
5.2	Testphase	75
5.2.1	Erste Testreihe	75
5.2.2	Zweite Testreihe	79
5.3	Evaluierung	81
5.4	Verbesserungsvorschläge	82
6	Zusammenfassung und Ausblick	84
6.1	Zusammenfassung	84
6.2	Ausblick	85

Abbildungsverzeichnis

2.1	Funktionsweise Trilateration	18
2.2	WLAN: Frequenzbereiche	20
2.3	SNMP: Komponenten und Prinzip	23
3.1	Übersicht BHM: Fahrzeugposition mit Anwender	30
3.2	Foto Tiefgarage: Übersicht Halle 1	32
3.3	Ablaufdiagramm: Betriebshofmanagement	35
3.4	Tiefgarage: WLAN mit Access Points	37
3.5	Tiefgarage: Ortung durch COO	38
3.6	Tiefgarage: Ortung durch RSSI	39
3.7	Foto Tiefgarage: Halle 1 mit Fahrzeugen	40
3.8	Tiefgarage: Ortung durch Fingerprinting	41
3.9	Design: Ortungssystem	42
3.10	Design: SNMP Fetcher	44
3.11	Diagramm: SNMP Traffic	45
3.12	Design: Data Cruncher	47
3.13	Screenshot: ivbBHM Infoscreen	49
4.1	Tiefgarage: Grundriss	53
4.2	Tiefgarage: Grundriss mit Rasterung	56
4.3	Halle 1: Raster und Messweg	57
4.4	Halle 1: Positionen der Access Points	58
4.5	Foto Tiefgarage: Neumontage WLAN Access Point	60
4.6	Halle 1: Site Survey mit zwei AP	61
4.7	Halle 1: Site Survey mit sechs AP	62
4.8	Halle 1: Site Survey mit achs AP	63
4.9	Screenshot: ivbBHM Weblösung	68
4.10	Screenshot: ivbBHM Betriebshof	69
4.11	Foto Tiefgarage: Gelenkbus und WLAN Access Point	70
4.12	Tiefgarage: Aufteilung in 12 Bereiche	71
5.1	Screenshot: ivbBHM2 Webinterface	74
5.2	Halle 1: Testumgebung bei Evaluierung	75

Tabellenverzeichnis

3.1	Fuhrpark und Ausstattung	30
3.2	Übersicht Tiefgarage	31
4.1	Fahrzeugarten mit Abmessungen	54
4.2	Auswahl installierter Access Points in Halle 1	65
4.3	Beispieldatensätze Fetcher Tabelle	66
5.1	Messreihe 1: Protokoll	76
5.2	Messreihe 1: SNMP Messages zu Messpunkt 2	76
5.3	Messreihe 1: SNMP Messages zu Messpunkt 3	77
5.4	Messreihe 2: Protokoll	79
5.5	Messreihe 2: SNMP Messages zu Messpunkt 4	79
5.6	Messreihe 2: SNMP Messages zu Messpunkt 5	80
5.7	Messreihe 2: SNMP Messages zu Messpunkt 6	81

Abkürzungsverzeichnis

AOA	Angle of Arrival.....	18
BHM	Betriebshofmanagement.....	14
BSSID	Basic Service Set Identification.....	43
CoO	Cell of Origin.....	19
DFS	Dynamic Frequency Selection.....	21
EIRP	Equivalent Isotropic Radiated Power.....	17
FDL	Fahrdienstleitung.....	13
FIFO	First In - First Out.....	39
GPS	Global Positioning System.....	12
IBIS	Integrierte Boardinformationssystem.....	31
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers.....	21
IR	Infrarot.....	68
IVB	Innsbrucker Verkehrsbetriebe und Stubaitalbahn GmbH.....	13
MIB	Management Information Base.....	24
OID	Object Identifier.....	24
RBL	Rechnergestütztes Betriebsleitsystem.....	32
RFID	Radio Frequency Identification.....	12
RSSI	Received Signal Strength Indicator.....	17
RTR	Rundfunk und Telekom Regulierungs-GmbH.....	20
SNMP	Simple Network Management Protocol.....	22
SNR	Signal-to-noise ratio.....	25
TDoA	Time Difference of Arrival.....	18
ToA	Time of Arrival.....	18
ToF	Time of Flight.....	18
TPC	Transmit Power Control.....	21
UDP	User Datagram Protocol.....	22

WECA	Wireless Ethernet Compatibility Alliance.....	20
WeSta	Werkstätte.....	13
Wi-Fi	Wireless Fidelity.....	20
WLAN	Wireless Local Area Network.....	12

Kapitel 1

Einleitung

Die Lokalisierung von Fahrzeugen spielt bei Verkehrsunternehmen eine immer wichtigere Rolle. Gleichmaßen im regulären Betrieb (eine Fahrt im Liniennetz) als auch am Betriebshofgelände ist die Position einzelner Fahrzeuge von großer Bedeutung. Um eine fahrplangerechte Bereitstellung fahrtüchtiger Fahrzeuge gewährleisten zu können, müssen vielseitige Anforderungen erfüllt werden. Als Beispiel sei die Planung von Reparaturen in der Werkstatt oder die kurzfristige Bereitstellung von Ersatzfahrzeugen seitens der Fahrdienstleitung genannt. Unterstützt wird diese Disposition üblicherweise durch ein softwaregestütztes Fuhrpark- und Betriebshofmanagement. Durch die Echtzeitinformation über die aktuellen Fahrzeugpositionen kann eine Verbesserung von Qualität und Effizienz im Betrieb erfolgen.

Ein weiterer Punkt ist eine fahrplangerechte Garagierung: Fahrzeuge werden Abends so in der Tiefgarage geparkt, dass sie ihrer Ausstattung und dem Fahrplan entsprechend der Reihe nach in der Früh ausfahren können. Auch hier wird eine Fahrzeugidentifikation sowie ein Ortungssystem vorausgesetzt. [VAB09], [COS13]

Bei der Lokalisierung von Fahrzeugen muss zwischen dem Außen- und dem Innenbereich unterschieden werden. Bei Unternehmen, welche im Öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) tätig sind, etablierten sich zur Ortung im Außenbereich die letzten Jahre hinweg eigene Funklösungen. Zum Beispiel Infrarot-Bakensysteme, welche über eine eigene Funkfrequenz die Daten zu einem Leitreechner senden. Zunehmend erfolgt allerdings die Positionsbestimmung im Freien über das Global Positioning System (GPS). Neben einer deutlich einfacheren Handhabung ist auch eine geringere Störanfälligkeit garantiert. Selbst im dicht besiedelten Stadtgebiet erreicht man zufriedenstellende Genauigkeiten.

Innerhalb von Gebäuden, unterdachten Stellflächen oder in Tiefgaragen existieren zumeist funkbasierte Lösungsansätze, wie zum Beispiel mittels Radio Frequency Identification (RFID) oder Wireless Local Area Network (WLAN). Oft werden diese Ansätze auch mit magnetischen Bodenschleifen kombiniert, um eine höhere Zuverlässigkeit zu erreichen. Realisierungen mittels optischer Verfahren haben sich in der Praxis als wenig brauchbar erwiesen.

Prinzipiell ist bei der Genauigkeit der Ortung die Zuverlässigkeit der Positionsdaten zu bevorzugen. Sowohl im Außen- wie auch Innenbereich muss grundsätzlich der infrastrukturelle und finanzielle Aufwand in Relation zur tatsächlich gewünschten Genauigkeit der Ortung stehen.

Diese Masterarbeit beschäftigt sich mit der unterirdischen Ortung von Fahrzeugen über WLAN. Mittels dauerhaft in den Garagen installierter Access Points soll die Position der Fahrzeuge bestimmt werden. In den Bussen bzw. Straßenbahnen ist dazu bereits ein WLAN-Modul verbaut. Die gewünschte Genauigkeit der Ortung soll durch die Kombination mehrerer Ortungsalgorithmen erreicht werden.

Die Arbeit befasst sich mit einem Teilbereich des Betriebshofmanagements. Als erster Test wird die unterirdische Ortung in einer Halle der Tiefgarage realisiert. Ist das Ergebnis dieser Untersuchung positiv, wird dieses Prinzip der Ortung sowohl in den weiteren Hallen sowie auch in den oberirdischen Gebäuden Verwendung finden. Im Freiluftbereich ist seitens der Verkehrsbetriebe zukünftig eine Kombination aus WLAN- und GPS-Ortung angedacht.

1.1 Motivation

In der vorliegenden Arbeit wird in Zusammenarbeit mit der Innsbrucker Verkehrsbetriebe und Stubaitalbahnen GmbH (IVB) versucht, eine stellplatzgenaue Fahrzeugortung in der Tiefgarage zu realisieren. Für die fahrplangerechte Disposition und die Behebung vorhandener Missstände bei der Fahrzeugreservierung wird das Wissen über den aktuellen Standort der Fahrzeuge im Betriebshof unabdingbar.

Gleichzeitig sollen die Standort-Informationen, welche über das bereits bestehende Funk-Bakensystem verfügbar sind, mittels Weblösung dargestellt werden. Mitarbeiter sollen damit die Möglichkeit besitzen, in Echtzeit einen Überblick über die am Betriebshofgelände befindlichen Fahrzeuge zu bekommen. Die möglichst genaue und fahrzeugspezifische Ortung in Echtzeit soll realisiert werden und die beiden Hauptbenutzergruppen (die Fahrdienstleitung (FDL) und die Werkstätte (WeSta)) bei ihrer täglichen Arbeit merklich entlasten.

Die Ermittlung von genauen Ortungsdaten ist für das Betriebshofsmanagement von großer Bedeutung. Darauf aufbauend lassen sich weitere Projekte realisieren. Eine vollautomatische Stellplatzzuweisung bei der Garagierung und ein optimiertes Fuhrparkmanagement seien hier nur stellvertretend genannt.

Ein weiteres Ziel dieser Arbeit ist es, die bestehende Infrastruktur bestmöglich auszulasten. So soll beispielsweise die bereits für die Datenversorgung (Fahrplan, Sprechansagen) der Fahrzeuge notwendig gewordene WLAN-Infrastruktur genützt werden. Die bei den meisten Fahrzeugen standardmäßig verbauten WLAN-Module sollen verwendet werden.

Eine Erweiterung um notwendig gewordene Access Points würde damit nicht nur für die Ortung sondern auch für andere Projekte eine Verbesserung darstellen.

Durch die Realisierung über WLAN werden sowohl die Investitionsausgaben als auch die laufenden Kosten gering gehalten. Auch der zeitliche Aufwand für die Integration neuer Fahrzeuge in den Fuhrpark bleibt überschaubar. Vor allem im Vergleich zu anderen Ortungstechniken, wo pro Fahrzeug zusätzliche Hardware notwendig werden würde (z.B. Ortung mit Hilfe von RFID-getagten Fahrzeugen).

1.2 Aufbau

Im Kapitel 1 (Einleitung) wird ein grundsätzlicher Überblick und die Zielsetzung der Masterarbeit dargestellt.

Kapitel 2 (Grundlagen) behandelt Lokalisierungssysteme und Verfahren zur Positionsbestimmung im Allgemeinen. Standards bei WLAN werden beschrieben und die in der Arbeit verwendeten IEEE-Standards erklärt. Im Abschluss werden Referenzprojekte beschrieben und ein möglicher erster Lösungsansatz skizziert.

Kapitel 3 (Design) beschäftigt sich mit dem grundsätzlichen Design der Lösung. Wie kann eine Ortung über WLAN funktionieren, welche Module werden dazu benötigt? Wie kann schließlich eine Positionsbestimmung einzelner Fahrzeuge erfolgen? Dieser Abschnitt versucht den grundsätzlichen Aufbau zu beschreiben. Es gilt, vorab möglichst alle auftretbaren Probleme zu erfassen.

Also erster Schritt erfolgt dabei ein Blick auf die Rahmenbedingungen bei den Innsbrucker Verkehrsbetrieben. Vorhandene Systeme werden erklärt und deren Zusammenhang mit dem Betriebshofmanagement erläutert.

In Kapitel 4 (Implementierung) erfolgt die genaue Beschreibung der Realisierung. Wie wurde die Ortung umgesetzt, welche Implementierungsform wurde gewählt? Wie wurde die Lösung in das Betriebshofmanagement (BHM) integriert und welche Schwierigkeiten traten auf?

Die Evaluierung erfolgt in Kapitel 5 (Evaluierung). Es werden Tests durchgeführt um die geforderte Qualität bestätigen zu können. Welche Probleme treten bei der Ortung auf und mit welcher Lösung wurde die höchste Genauigkeit erreicht?

Die Arbeit schließt mit der Zusammenfassung (Kapitel 6). Es erfolgt eine Zusammenfassung der Arbeit mit allen Problemen und Verbesserungsvorschlägen. Weiters wird ein Ausblick beschrieben.

Kapitel 2

Grundlagen

In diesem Abschnitt werden Grundlagen von Lokalisierungsprinzipien erklärt und gängige Methoden zur Positionsbestimmung beschrieben.

Die Wireless LAN Technologie wird in einem eigenen Punkt erklärt und die IEEE Standards sowie das SNMP Netzwerkprotokoll erläutert. Im Anschluss wird noch das für diese Arbeit notwendige Prinzip der WLAN Vermessung (Site Survey) erklärt.

Im letzten Abschnitt werden Referenzbeispiele aufgelistet und beschrieben, mittels welcher Techniken andere Verkehrsunternehmen die Fahrzeugortung gegenwärtig durchführen.

2.1 Lokalisierungssysteme

Grundsätzlich unterscheidet man zwischen *symbolischer* und *physikalischer Position*. Bei symbolischen Positionen besteht ein Bezug zu einem Kontext (z.B. Hausnummer). Bei physikalischen Modellen hingegen wird ein Punkt in einem n-dimensionalen Koordinatensystem angegeben (z.B. GPS-ermittelte Daten).

2.1.1 Absolute und relative Lokalisierung

Bei der *absoluten Lokalisierung* wird die Position unabhängig von Bewegung und älterer Position bestimmt. Als Beispiel sei die GPS-Lokalisierung erwähnt, wo die Angabe in Längen- und Breitengraden erfolgt.

Die *relative Lokalisierung* baut prinzipiell auf der absoluten Lokalisierung auf - das bedeutet, die vorherige Position muss bekannt sein. Die zuvor gemessene Position wird in Relation zur Neupositionierung gesetzt. Relative Lokalisierungen dienen vor allem als Ergänzung zur absoluten Lokalisierung. Beispielfhaft sei die Ortung von Lawinenopfern erwähnt, sofern diese einen Signalgeber bei sich tragen. Jeder Sucher kann die Richtung, aus der das Signal eines Verschütteten kommt, mit seinem Gerät empfangen. Dabei werden keine absoluten Daten bezüglich der Position der Opfer auf den Empfängern angezeigt, sondern in etwa die Richtung angepeilt, die der Suchende gehen muss. [Teker05]

2.1.2 Genauigkeit und Reichweite

Zur Bestimmung der Exaktheit eines Positionierungssystems muss die *Auflösung* bestimmt werden. Als Auflösung bezeichnet man die Entfernung von gemessener zur exakten Position. Die *Genauigkeit* gibt an, mit welcher Häufigkeit eine bestimmte Auflösung erzielt wird und bezieht sich entweder auf ein Koordinatensystem oder eine vordefinierte Umgebung in welcher das Lokalisierungssystem verwendet wird. Hybridtechnologien verbessern die Genauigkeit und Auflösung eines Messsystems.

Die *Reichweite* wird im Kontext zum Einsatzgebiet der Technik gesehen. Objekte können innerhalb eines gewissen Bereichs geortet werden, die Reichweite entspricht dabei dem Empfangsbereich der Sendersignale. Die Reichweite eines Systems hängt dabei direkt von der verwendeten Technik bzw. der vorhandenen Infrastruktur ab.

2.1.3 Selbstortung und Fernortung

Ein *selbstortendes Gerät* (z.B. GPS-Navigationsgerät) errechnet anhand der empfangenen Signale von GPS-Satelliten die Position aufgrund eines im Gerät implementierten eigenen Algorithmus und stellt diese Ausgabe für den Benutzer dar.

Bei der *Fernortung* erfolgt die Positionsbestimmung entsprechend umgekehrt, mit dem Vorteil der Arbeitsteilung und teilweise besseren Ressourcenteilung. Nachteilig wirkt sich die Belastung des zugrunde liegenden Netzwerks aus.

2.1.4 Koordinatensystem

Bei den Koordinatensystemen unterscheidet man zwischen geradlinigen (affinen) und krummlinigen Systemen. Grundsätzlich erfolgt eine Positionsangabe über Längs- und Breitengrade.

Für die Positionszuordnung in der Tiefgarage erscheint es sinnvoll, ein eigenes Koordinatensystem mit selbst gewähltem Nullpunkt in der Garage aufzubauen. Die Umrechnung bzw. Referenzierung auf ein anderes Koordinatensystem stellt keine Herausforderung dar und kann leicht in das Betriebshofmanagement integriert werden. Die genaue Realisierungsform wird unter Punkt 4.2.2 abgehandelt.

2.2 Verfahren und Techniken der Positionsbestimmung

Grundsätzlich sind für eine erfolgreiche Positionsbestimmung drei Faktoren wichtig:

- Objekt
- Ort
- Zeit

Die Ermittlung der Ortsangabe stellt dabei naturgemäß die größte Herausforderung dar. Die Signale können auf unterschiedliche Art und Weise interpretiert werden, es bedarf dabei jeweils entsprechender Hardware beim Empfangsgerät. Nachfolgend eine Auswahl von Möglichkeiten zur zweidimensionalen Positionsbestimmung. [Fraunhofer13], [Gustafsson02], [Teker05]

2.2.1 Received Signal Strength Indication

Unter dem RSSI versteht man einen Indikator für die empfangene Signalstärke bei Funknetzwerken. Die Einheit ist nicht genau spezifiziert, allgemein bedeutet ein höherer RSSI-Wert ein stärkeres Signal. Als übliche Maßeinheiten dienen dBm bzw. mW und der Zusammenhang ist mit $0dBm = 1mW$ an 50Ω definiert.

Eines der am häufigsten angewandten Ortungsverfahren basiert auf der Messung der Feldstärke. Die empfangene Feld- bzw. Signalstärke (Received Signal Strength Indicator (RSSI)) ist abhängig von der Entfernung zwischen Sender und Empfänger, sowie von der Sendeleistung der Funkstation (Equivalent Isotropic Radiated Power (EIRP)). Unter idealen Bedingungen nimmt die Signalstärke exponentiell ab. [Grossmann07a], [Gursch11], [Ji04], [Macnamara10]

Den Zusammenhang beschreibt Formel (2.1), welche direkt den Abstand zwischen Sender und Empfänger ermitteln lässt. λ entspricht der Wellenlänge, P_T und P_R der Leistung von Sender (Transmitter) und Empfänger (Receiver) und G_T, G_R der entsprechenden Antennenverstärkung.

$$d = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \sqrt{\frac{P_T \cdot G_T \cdot G_R}{P_R}} \quad (2.1)$$

Das Modell stimmt allerdings nicht mit der Realität überein: einerseits kommt es aufgrund von Signalreflexionen bzw. Signalabsorptionen (sog. Multipath Phänomen) zu unangenehmen Überlagerungen und andererseits treten Signaldämpfungen durch störende Hindernisse auf.

Das Verfahren stellt zwar einen geringen technischen Aufwand dar, ist jedoch für eine WLAN-Ortung innerhalb von Gebäuden nur bedingt geeignet und bietet nur eine beschränkte Genauigkeit. Die Positionsbestimmung selbst erfolgt dann beispielsweise über Trilateration.

2.2.2 Triangulation und Trilateration

Bei der *Triangulation* erfolgt die Berechnung der Position über die Winkelbeziehungen. Relativ einfach und schnell kann eine Position ermittelt werden, wenn mindestens zwei Punkte mit bekannter Position zur Verfügung stehen.

Im Gegenzug wird bei der *Trilateration* die Position aus Entfernungsangaben bzw. Abständen berechnet. Es werden mindestens drei bekannte Referenzpunkte benötigt, um eine zweidimensionale Lokalisierung durchführen zu können, siehe Abbildung 2.1. Der Abstand zu den Signalquellen lässt sich dann bestimmen, wenn die RSSI-Werte von mindestens drei benachbarter Sender vorliegen. Bei bekannten Positionen der Signalquellen kann so durch Trilateration die Position des Messpunktes errechnet werden. [Grossmann07b]

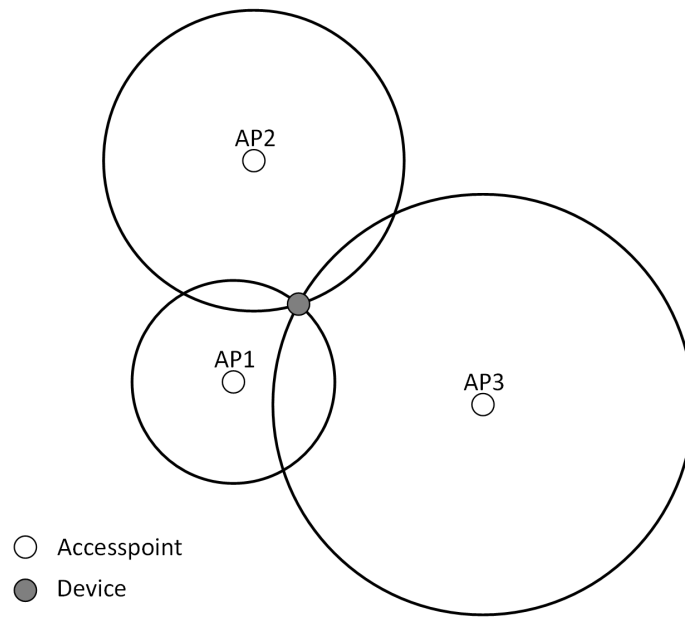


Abbildung 2.1: Funktionsweise der Trilateration.

Meist fällt die Berechnung von Entfernungen leichter als die von Winkeln, weshalb die Trilateration im Vergleich zur Triangulation den Vorteil des geringeren technischen Aufwands besitzt. [GIS12]

2.2.3 Time of Arrival

Die Laufzeitmessung (Time of Arrival (ToA), oft auch Time of Flight (ToF)) basiert auf Messungen der Distanz zwischen zwei Punkten. Jedes Signal besitzt eine endliche Signalausbreitungsgeschwindigkeit. Sind Sende- und Empfangszeit und damit auch die Signallaufzeit bekannt, kann die Entfernung zwischen Sender und Empfänger errechnet werden. Bei GPS und Radar kommt diese Technik zum Einsatz. [Tekker05], [Zimmermann01]

2.2.4 Time Difference of Arrival

Bei der Laufzeitdifferenzmessung (Time Difference of Arrival (TDoA)) wird die zeitliche Differenz beim Empfang der Signale gleichzeitig sendender Sender gemessen. Durch Auswertung der Laufzeitunterschiede und mit Hilfe der Triangulation kann die Position des Endgerätes ermittelt werden. Üblicherweise können mittels TDoA höhere Genauigkeiten erzielt werden.

2.2.5 Angle of Arrival

Ein weiteres Verfahren arbeitet mit dem Eingangswinkel des Empfangssignals (Angle of Arrival (AOA)). Ist die Richtung, aus der ein Signal kommt, bekannt, ist eine zweidimensionale Ortung möglich. Die Entfernung zwischen den beiden Sendern muss dabei bekannt

sein. Meist kommt bei dieser vor allem von Radarsystemen genutzten Technik ein Array von gerichteten Antennen zum Einsatz.

2.2.6 Cell of Origin

Als weitere Möglichkeit sei die Zellenreichweite eines Senders (Cell of Origin (CoO)) genannt. Hierbei kann durch die Position von Netzkomponenten, die ein Endgerät empfangen kann, bestimmt werden, in welchem Bereich der Zelle sich das Endgerät befindet. Die Genauigkeit wird dabei über die Zellgröße definiert. Diese Technologie wird von Mobilfunkbetreibern verwendet. [EKomp13]

2.2.7 Fingerprinting

Als letzte Technik wird Fingerprinting erwähnt. Hier wird mit den bereits beschriebenen RSSI gearbeitet. Die vom Client empfangenen Signalstärken werden dabei mit bereits vorher aufgenommenen Messwerten verglichen und dem Fahrzeug diejenige Zelle zugeordnet, welche die geringste Abweichung bedeutet. [FHD09], [Fuqiang11], [Grossmann07b], [Honkavirta09], [Linnhoff10], [Rohrig07], [Saha03]

Bei der Positionsbestimmung durch Fingerprinting unterscheidet man zwei Phasen:

Lernphase: Einlesen

Während dieser Kalibrierungsphase wird das Messareal eingemessen. An einer Reihe möglichst gleichmäßig über das Areal verteilter Punkte mit bekannter Position werden alle empfangbaren Signalstärkewerte der Basisstationen gemessen und in einer Datenbank gespeichert. Je höher die Messauflösung, desto besser und genauer kann im nächsten Schritt die Zuordnung erfolgen.

Betriebsphase: Lokalisieren

In der Ortungsphase erfolgt ein Vergleich der am unbekanntem Ort gemessenen Signalstärken mit bekannten Werten in der Kalibrierungsdatenbank. Die Position, welche vom RSSI-Wert am ähnlichsten ist, wird als Messposition angesehen.

Dieser Vergleich kann durch mehrere Methoden erfolgen:

Als einfachstes über den Euklidischen Abstand zweier Messpunkte. Oder das statistische Bayes-Verfahren, bei welchem Histogramme von Signalstärken-Tupeln miteinander skalar multipliziert werden und sich durch Wahrscheinlichkeitsverteilungen die Messposition bestimmen lässt. Andere Ansätze arbeiten mit neuronalen Netzwerken, der Fuzzy Logik oder über das Isolinienverfahren. Bei letzterem wird ein flächendeckendes Dreiecksnetz auf dem Messareal erstellt. Die Eckpunkte der Dreiecke stellen jeweils Messpunkte aus der Lernphase dar. Durch Interpolation und Erstellung von Trajektorien können die Dreiecke bei einer Ortung gewichtet werden und höhere Genauigkeiten erzielt werden.

2.3 Wireless Local Area Network

2.3.1 Definition

Unter dem Begriff *WLAN* versteht man ein schnurloses Netzwerk (Wireless Local Area Network). Die Bezeichnung *IEEE 802.11* stellt hingegen einen Standard für eine technische Lösung eines Wireless LAN dar.

Im allgemeinen Sprachgebrauch wird ein auf dem IEEE 802.11 Standard aufgebautes lokales Funknetzwerk oftmals als Wireless LAN bzw. WLAN bezeichnet. [EKomp15]

Der Kunstbegriff *Wireless Fidelity (Wi-Fi)* bezeichnet eine Zertifizierung (WiFi certified) von Geräten durch die WiFi-Alliance anhand von IEEE Standards für WLAN. Die WiFi-Alliance ist eine aus über 300 Unternehmen bestehende, 1999 gegründete, ursprünglich Wireless Ethernet Compatibility Alliance (WECA) geannante, gemeinnützige Organisation, mit dem Ziel einer einheitlichen und problemlosen Kommunikation verschiedener Wireless-Geräten. [WIFI15]

2.3.2 Frequenzbänder und Kanäle

Für WLAN kommen zwei Frequenzbereiche zum Einsatz: 2,4 GHz und 5,0 GHz. Beide sind weltweit lizenzfrei nutzbar. Die Frequenzvergabe wird in Österreich durch die Rundfunk und Telekom Regulierungs-GmbH (RTR) durchgeführt. Abbildung 2.2 gibt einen Überblick der Frequenzbereiche. [RTR15]



Abbildung 2.2: WLAN Frequenzbereiche mit Zuständigkeit RTR, Quelle: [RTR15].

Das 2,4 GHz Band:

Im gebührenfreien 2,4GHz Frequenzband werden von WLAN-Geräten die Kanäle 1 (2412 MHz) bis 13 (2472 MHz) genützt. Es kommt zu Überlappungen benachbarter Kanäle, da WLAN eine Bandbreite von cirka 20 bzw. 40 MHz nutzt, der Abstand zwischen benachbarten Kanälen aber nur 5 MHz beträgt.

Der großen Verbreitung und der geringen Hardwarekosten steht die gemeinsame Nutzung mit anderen Funktechniken (Bluetooth, Mikrowellenherde, etc.) gegenüber. Es kann dadurch zu massiven Störungen und Interferenzen kommen.

Das 5 GHz Band:

Dieses derzeit noch weniger genutzte Frequenzband teilt sich (im EU-Raum) in zwei Bereiche auf: 5150 MHz bis 5350 MHz (Kanal 36 bis 64) und 5470 MHz bis 5725 MHz (Kanal 100 bis 140). Die höhere Dämpfung wird mit einer gesetzlich höher erlaubten maximalen Sendeleistung (bis zu 1000 mW) kompensiert. Dadurch und auch wegen dem generell störungsärmeren Betrieb sind bessere Reichweiten möglich.

In Europa gelten stärkere Regulierungen für das 5 GHz Band. Für gewisse Kanäle ist die Verwendung im Freien untersagt. Will man von den verfügbaren 19 Kanälen welche oberhalb von 5250 MHz nutzen, so wird die Verwendung von Dynamic Frequency Selection (DFS) und Transmit Power Control (TPC) verpflichtend. Dadurch wird bspw. sichergestellt, dass durch automatische Kanalwechsel der Betrieb von Wetterradarsystemen nicht gestört wird. [Skynet15]

2.3.3 Standards nach IEEE 802.11

Die IEEE 802.11 Norm wird vom Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) herausgegeben und spezifiziert die Kommunikation in Funknetzwerken. Mittlerweile besteht die Normenfamilie aus 12 Normen: 802.11, 802.11a, 802.11b, 802.11c, 802.11d, 802.11e, 802.11f, 802.11g, 802.11h, 802.11i, 802.11j und 802.11n. Nachfolgend eine Auswahl der häufigsten IEEE 802.11 Normen. [IEEE15]

802.11 Einführung 1997; Frequenzband: 2,4 GHz; Bandbreite: 20 MHz; Datenrate: bis 2 Mbit/s brutto; Übertragungsart: Frequenzsprungverfahren (FHSS) oder Frequenzspreizverfahren (DSSS); ursprünglicher Standard.

802.11a Einführung 1999; Frequenzband: 5 GHz; Bandbreite: 20 MHz; Datenrate: bis 54 Mbit/s brutto; Modulationsverfahren: Orthogonales Frequenzmultiplexverfahren (OFDM) und DSSS; Erweiterung der physikalischen Schicht (PHY); 12 nichtüberlappende Kanäle.

802.11b Einführung 1999; Frequenzband: 2,4 GHz; Bandbreite: 20 MHz; Datenrate: bis 11 Mbit/s brutto; Modulationsverfahren: DSSS mit Complementary Code Keying (CCK); veraltet; 3 nichtüberlappende Kanäle.

802.11g Einführung 2003; Frequenzband: 2,4 GHz; Bandbreite: 20 MHz; Datenrate: bis 54 Mbit/s brutto; Modulationsverfahren: OFDM und DSSS; große Verbreitung.

802.11n Einführung 2009; Frequenzband: 2,4 GHz und 5 GHz; Bandbreite: 20/40 MHz; Datenrate: bis zu 600 Mbit/s brutto; Modulationsverfahren: Multiple Input Multiple Output (MIMO) und OFDM; überwiegender Standard.

802.11ac Einführung 2013; Frequenzband: 5 GHz; Bandbreite: 40/80/160 MHz; Datenrate: im Gigabitbereich; Modulationsverfahren: OFDM; Erweiterung zu 802.11n, Optimierung des Übertragungsprotokolls.

802.11ad Einführung 2013; Frequenzband: 60 GHz; Bandbreite: 2160 MHz; Datenrate: im Gigabitbereich; Modulationsverfahren: OFDM und Quadraturamplitudenmodulation (QAM64); geringe Reichweite, 60 GHz-Band mit 2 GHz breiten Funkkanälen, für schnelle Punkt-zu-Punkt Verbindungen.

2.3.4 Kompatibilitäten

Die beiden Standards 802.11b und 802.11g sind zueinander kompatibel, allerdings mit reduzierter effektiver Geschwindigkeit.

Bei den Normen 802.11a und 802.11h ist eine zueinander uneingeschränkte Kompatibilität gegeben.

2.3.5 Maximal zulässige Sende- bzw. Strahlungsleistungen

Im 2,4 GHz Bereich liegt das Maximum bei 100 mW EIRP in Deutschland und Österreich. In den USA sind bis zu 300 mW EIRP erlaubt.

Die Regelung im 5,0 GHz Band dürfen je nach Frequenzband zwischen 25 mW und 4000 mW EIRP maximal verwendet werden.

2.4 Simple Network Management Protocol

Das Simple Network Management Protocol (SNMP) ist ein weit verbreitetes Application Layer Protokoll zur Überwachung und Steuerung einzelner Komponenten in einem Netzwerk. Zu den Komponenten zählen zertifizierte Netzwerkgeräte jeder Art, wie z.B. Router, Switches, Drucker oder auch WLAN Access Points. Das Protokoll ist für die Kommunikation zwischen den überwachten Geräten und der Überwachungsstation zuständig und erfolgt über das User Datagram Protocol (UDP). [MS03], [ManageEngine15]

Durch seine Einfachheit und Modularität ist SNMP mittlerweile weit verbreitet und wird von den meisten verfügbaren Netzwerkkomponenten unterstützt. Mit dem Netzwerkprotokoll werden folgende Funktionen ermöglicht:

- Überwachung von Netzwerkkomponenten
- Fernsteuerung von Netzwerkkomponenten
- Fehlererkennung und -benachrichtigung

2.4.1 Aufbau und Module

In der Architektur von SNMP wird klassischerweise zwischen dem Manager, den verschiedenen Netzwerkgeräten und den zugehörigen Agenten unterschieden. Abbildung 2.3 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Protokolls.

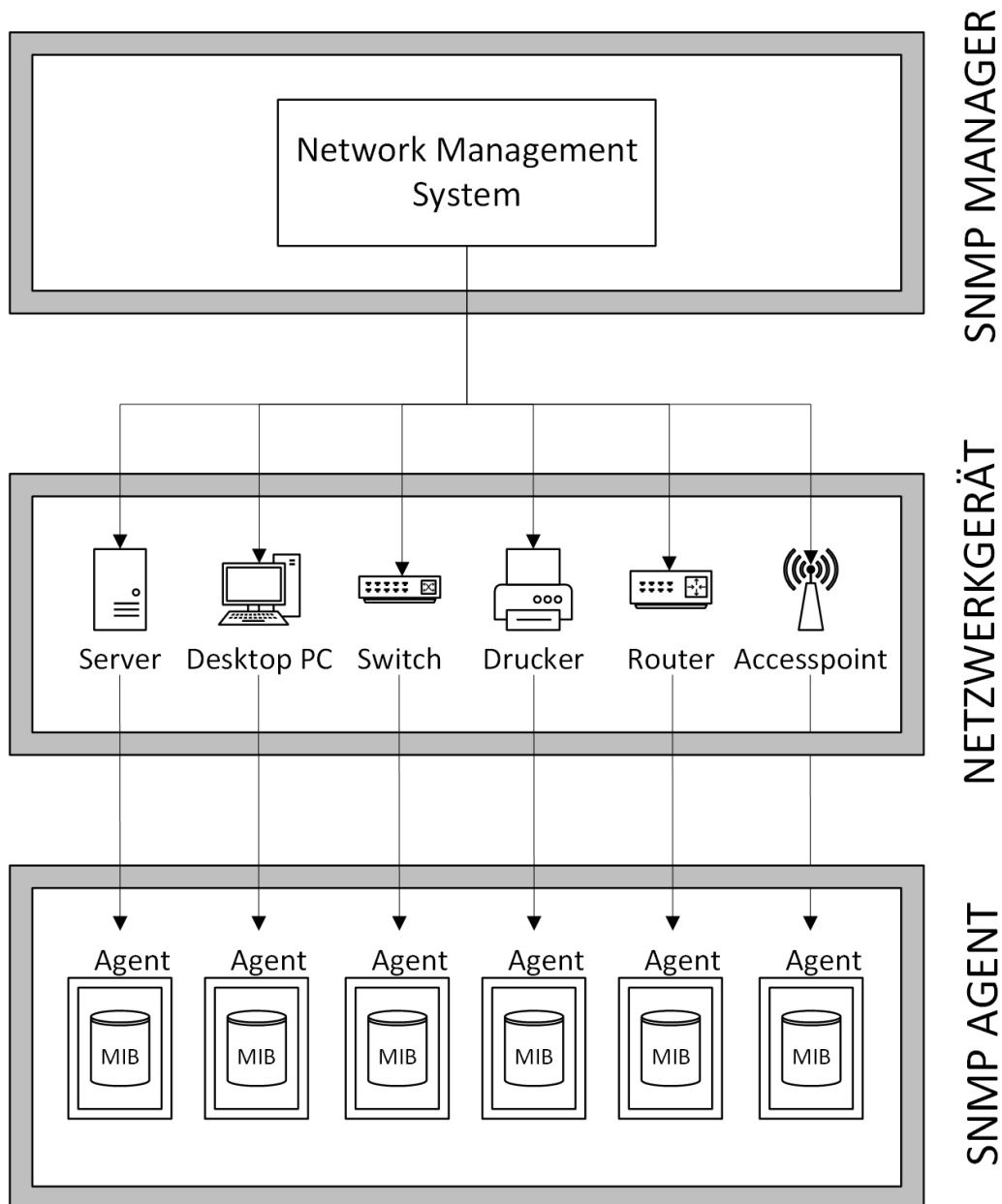


Abbildung 2.3: Komponenten von SNMP.

SNMP Manager:

Der Manager bzw. das Management System ist eine zentrale Einheit. Sie wird zumeist als eigenständiger Server ausgeführt. Seine Hauptaufgaben sind:

- die einzelnen Agenten abzufragen
- Rückmeldungen von Agenten zu erhalten
- Variablen bei den Agenten festzulegen
- Quittierung von asynchronen Events der Agenten

SNMP Agent:

Unter den SNMP Agenten versteht man Programme, welche auf den einzelnen Netzwerk-Komponenten ausgeführt werden. Das Programm kann Managementfunktionen ausführen. Gleichzeitig sammelt der Agent Informationen über seine lokale Umgebung (z.B. CPU Auslastung, Temperatur, Anzahl Kommunikationspartner). Agenten sind in der Lage, bei Bedarf am Gerät Einstellungen vorzunehmen oder Aktionen auszulösen. Gewisse Agenten besitzen auch die Möglichkeit, unaufgefordert Meldungen an den SNMP-Manager zu kommunizieren.

Management Information Base (MIB):

Jeder SNMP Agent besitzt zur Beschreibung der unterstützten Geräte-Parameter eine Informationsdatenbank, die sogenannte MIB. Sie hilft dem Manager dabei, welche Werte er vom Agenten anfragen bzw. ändern lassen kann. Die Management Information Base besteht aus Informationen für das jeweilige Netzwerkgerät, die sogenannten Object Identifier (OID).

Welche Werte eine Netzwerkkomponente liefern kann oder nicht, wird per SNMP nicht definiert. Diese Angaben sind herstellerspezifisch.

2.4.2 Kommunikation

Die Kommunikation zwischen SNMP Manager und den einzelnen Agenten erfolgt in der Regel über *polling*: der Manager schickt einen Request an den Agenten, welcher den Befehl ausführt und mit einem Response antwortet. Manche Agenten unterstützen auch das Versenden von Meldungen (*traps*) an den Manager bei unvorhergesehenen Ereignissen.

Die Kommunikation kann mit Hilfe von verschiedenen Datenpaketen erfolgen:

GET: diese Message wird vom SNMP Manager an einen Agenten gesendet und dient zum einmaligen, aktiven Abfragen des Clients.

GET NEXT: entspricht einer Erweiterung der GET-Message und ist hilfreich zur Abfrage nachfolgender Objekte. Der Manager bekommt den Wert der nächsten OID im MIB-Baum. Damit lassen sich schnell und einfach Tabellen durchlaufen.

GET BULK: ist ein nützlicher Befehl, um mehrere Datensätze gleichzeitig abrufen zu können. Wird erst ab Version SNMPv2 unterstützt.

SET: dabei handelt es sich um die einzige Möglichkeit für den Manager, aktiv über den Agenten Daten ändern zu lassen.

TRAP: diese Messages werden unaufgefordert vom Agenten an das Management-System geschickt. Ein Trap wird ausgelöst, wenn Unvorhergesehenes und Bedeutendes passiert.

RESPONSE: Antwort-Message auf eines der Management-Pakete.

Die 1988 entwickelte erste Version von SNMP wurde 1992 und 1993 überarbeitet und von SNMPv2p und SNMPv2u abgelöst. Derzeit am weitesten verbreitet ist die community-based Version SNMPv2c. Mit ihr ist der GET BULK Befehl und eine Kommunikation zwischen unterschiedlichen Managern möglich. Die nicht vorhandenen Sicherheitsmechanismen wurden mit Version 3 ausgebaut und 2002 genauer spezifiziert. Diese user-based-security Version bietet Authentifizierungsmöglichkeit für die Benutzer, sowie eine Verschlüsselung der Datenpakete. [Eisner11]

2.5 Wireless LAN Site Survey

Unter dem Begriff *Site Survey* versteht man im Allgemeinen eine Standort- bzw. Geländeaufnahme. Mit spezieller Hard- und Software lassen sich so zum Beispiel ganze WLAN-Netzwerke vermessen. Unterschiedliche Software-Hersteller ermöglichen die Aufzeichnung von Signalstärken und damit eine flächendeckende WLAN-Versorgung zu realisieren. Dabei wird in die Software der Grundriss einer Fläche bzw. eines Gebäudes eingelesen. Ein Referenzpunkt (Ursprungspunkt des Koordinatensystems) wird gewählt und der richtige Maßstab für die Nachbearbeitung ausgewählt. [Ekahau14], [Fluke14]

Während einer Messung werden kontinuierlich sämtliche Signalstärken aller empfangbaren WLANs aufgezeichnet. Zusätzlich erhält man Informationen über Channel-Interferenzen, Signal-to-noise ratio (SNR), packet loss, etc. Zur Erreichung genauerer Ergebnisse wird meist eine externe, empfangsstärkere WLAN-Antenne verwendet.

Die geographische Zuordnung der Messdaten kann auf zwei Arten von Surveys erfolgen:

GPS-unterstützt:

Dabei wird die aktuelle Position vom Messgerät mittels GPS-Empfänger (z.B. im Notebook integriert oder externer Dongle) automatisch mitgeloggt. Diese Variante setzt naturgemäß einen GPS-Empfang während der Messung voraus.

Manuelle Positionsbekanntgabe:

Innerhalb von Gebäuden bzw. in Gebieten ohne GPS-Empfangsmöglichkeit muss der Software der aktuelle Standort händisch mitgeteilt werden. Dazu werden während der Messung fixe Punkte am Plan markiert. Zwischen diesen Punkten erfolgt eine softwareseitige Interpolation. Aus praktischen Gründen empfiehlt es sich, dem Grundrissplan einen Raster überzublenen. Während der Site Survey wird so beispielsweise mittels Meterwalze (oder Maßband) der Weg mitgemessen und alle zwei Meter die Position markiert.

Im Zuge dieser Masterarbeit ist es wichtig, das bestehende WLAN-Netz in der Tiefgarage einzumessen. Erstens bekommt man dadurch einen Eindruck, wo weitere Access Points am besten platziert werden sollen und zweitens bekommt man durch die Site Survey die für die Ortung relevanten Messwerte der Signalstärken der Fahrzeuge. In den nachfolgenden Kapiteln wird auf diese Methode genauer eingegangen.

2.6 Betriebshofmanagement

Der Betriebshof stellt die zentrale Drehscheibe eines jeden Verkehrsunternehmens dar. Die Fahrzeuge befinden sich gerade in der Werkstatt, in der Reinigung oder bereits auf einem fixen Stellplatz. Der Fahrer sucht zu Dienstbeginn seinen Bus, die Werkstatt zur Durchführung wichtiger Servicearbeiten ein nur kurzfristig verfügbares Fahrzeug, oder eine Straßenbahn muss zur Neubeklebung von Werbung in der Remise aufgefunden werden. - Viele Arbeitsbereiche sind hier eng miteinander verzahnt. Ein Betriebshofmanagement dient dazu, einen reibungslosen Ablauf zwischen diesen Bereichen zu gewährleisten. Betriebsabläufe und Bedienhandlungen werden automatisiert und Prozesse im Fahrzeug- und Personaleinsatz optimiert. Disponenten, Werkstattpersonal und weitere Mitarbeiter werden bei der Planung und Vorbereitung sowie der Überwachung und Auswertung des Fahrzeugeinsatzes permanent unterstützt. [PSI15b]

Ein leistungsstarkes Betriebshofmanagement dient zur Bewältigung komplexer Aufgaben und stellt sich als wesentliche Schnittstelle in einem ÖPNV-Unternehmen dar. Aus unterschiedlichen Softwareprodukten werden Informationen gesammelt, ausgewertet, verknüpft und Web-basiert an den User weitergegeben. Dieser kann umgekehrt über geeignete Interfaces Wartungsarbeiten durchführen und mit dem System interagieren.

Grundsätzlich ähneln sich die Abläufe auf den Betriebshöfen unterschiedlicher Verkehrsunternehmen. Dennoch weist jedes Unternehmen oder vielmehr jeder Betriebshof spezielle Besonderheiten auf. Bauliche Voraussetzungen, definierte Arbeitsprozesse im Unternehmen, dem Fuhrparkmanagement oder dem Fahrzeugeinsatz - eine individuelle Lösung der Anforderungen ist gefragt. [Stimmerling12]

2.7 Referenzprojekte

Die Ortung von Bussen oder Straßenbahnen am Betriebshofgelände erfolgt zumeist funkbasiert. Nachfolgend eine Auswahl von Referenzprojekten.

Fraunhofer IIS: [Fraunhofer13]

Das Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen setzte sich mit der *Signalstärkebasierten Lokalisierungsbasis für ortsabhängige Dienste* auseinander und führte Messversuche mit WLAN Geräten durch. Es bestätigen sich dabei im realen Umfeld eine inhomogene Signalausbreitung sowie Signalüberlagerungen aufgrund der Mehrwegausbreitung.

Das IIS weist darauf hin, dass kommerzielle Endgeräte nicht für Messwertaufnahmen optimiert sind und ein aktives Scanning das bestehende Netzwerk massiv beeinflussen kann. Weiters kann es durch Kanalwechsel beim Scanning zu Kommunikationsunterbrechungen kommen. Bezüglich Lokalisierungsverfahren erfolgt beim IIS eine Aufteilung in Basisverfahren (Trilateration, Fingerprinting) und Anwendungsverfahren (Bereichsortung, spontane und kontinuierliche Ortung).

Das Matching (aufgrund von Messwert und Referenzdaten einen Referenzpunkt zuweisen) erfolgt anhand einer RSSI-sortierten Liste oder über Neuronale Netzwerke. Interessant sind dabei die vorgeschlagenen Optimierungsansätze:

- Einbeziehung der Umgebungsinformation
- Ausnutzen von Bewegungsmodellen
- Einsatz getrennter Verfahren für Initialisierung und kontinuierliche Positionierung

Zur Anwendung kommen die Erkenntnisse unter anderem beim Mobilien Informationssystem *Mobile Walk* (mittels WLAN RSSI Fingerprinting), Mobilien Messeführer *Messe Guide* (autarkes WLAN RSSI Fingerprinting) sowie bei der Lokalisierung von Sicherheitspersonal (GSM und WLAN RSSI Fingerprinting).

Verkehrsautomatisierung Berlin GmbH: [Agilion13], [VAB15]

Die VAB GmbH ist führender Anbieter von Betriebshofmanagement-Systemen im ÖPNV. Gemeinsam mit dem Kooperationspartner Agilion GmbH werden integrierte Funkortungen realisiert. Das Lösung *Wireless Location System* bietet dabei eine Fahrzeugverfolgung in Echtzeit und eine bereichsgenaue Ortung. Umgesetzt wurde das System unter anderem bei der Magdeburger Verkehrsbetriebe GmbH & Co. KG und der Leipziger Verkehrsbetriebe GmbH.

PSI Transcom GmbH: [PSI15a]

Eine erfolgreiche funkbasierte Ortung von Straßenbahnen und Bussen konnte PSI bei der Stuttgarter Straßenbahn AG umsetzen. Hier erfolgt die Positionsbestimmung allerdings aus einer Kombination von RFID und WLAN. Die Standortinformation wird automatisch in das PSI Betriebshofmanagement integriert.

2.8 Zusammenfassung

Für ein erfolgreiches Betriebshofmanagement in einem Verkehrsunternehmen mit über 200 Fahrzeugen scheint die Information über den genauen Stellplatz am Betriebshof unerlässlich. Die am Markt befindlichen Systeme stellen sowohl ein hohen finanziellen (einmalige sowie laufende Kosten) als auch infrastrukturellen Aufwand dar. Die Genauigkeit der Ortung lässt sich durch mathematische Modelle bei einfachen Systemen deutlich erhöhen, da bei durchschnittlichen Fahrzeuglänge von 12 bis 27 Meter die Genauigkeitstoleranz nicht im Millimeterbereich ist.

Die Ortung über WLAN scheint bei den gegebenen Anforderungen die vernünftigste Variante zu sein, zumal in den Tiefgaragen zumindest eine grobe Versorgung mit Access Points bereits vorhanden ist. Mit Problemen ist dabei durch starke Reflexionen an Beton- und Fahrzeugoberflächen zu rechnen.

Kapitel 3

Design

In diesem Kapitel erfolgt zu Beginn eine Analyse der Innsbrucker Verkehrsbetriebe. Die Systemumgebung sowie deren Anwender werden beschrieben und Abläufe erläutert. Zusammenhänge im Betriebshofmanagement werden erklärt und mit Hilfe eines Ablaufdiagramms dargestellt. In Folge werden die bereits unter Kapitel 2 beschriebenen Ortungstechniken auf deren Verwendbarkeit in der Tiefgarage überprüft. Daran anschließend folgt das Konzept für die Initialisierungsphase.

Als letzter Punkt wird die Lokalisierungsphase beschrieben. Einzelne Module werden erklärt und schließlich im Betriebshofmanagement zusammengeführt.

3.1 Analyse Betriebshof Innsbrucker Verkehrsbetriebe

Die Innsbrucker Verkehrsbetriebe und Stubaitalbahn GmbH befördert jährlich knapp 50 Millionen Fahrgäste auf einem Liniennetz von etwa 340 Kilometer. Auf über 30 Linien werden insgesamt circa 8.500.000 Kilometer gefahren. Der dazu notwendige Fuhrpark besteht aus 32 Straßenbahnen und mehr als 60 Bussen. [IVB15]

Die Positionsbestimmung der Fahrzeuge funktioniert bei der IVB derzeit überwiegend mittels im Stadtgebiet und am Betriebshofgelände fix installierten IR-Baken. Diese kommunizieren mit den vorbeifahrenden Fahrzeugen per Infrarot. Über ein eigenes Funkdatennetz werden die Informationen dann an den zentralen Hauptrechner übermittelt und zentral ausgewertet.

Durch die gleiche Technik kann unter anderem der Betriebshof in mehrere Teilbereiche aufgeteilt werden und in einem ersten Schritt die grobe Fahrzeugposition am Gelände verwirklicht werden. Die Darstellung der Fahrzeugpositionen erfolgt dabei bereits über ein Web-basiertes BHM. Die Genauigkeit dieser Lokalisierungstechnik ist jedoch für den Betrieb nicht ausreichend bewerkstelligt. So kann zum Beispiel in der Tiefgarage nur die Ein- und Ausfahrt detektiert werden. Die Information, wo genau sich das Fahrzeuge in der Garage befindet, ist nicht vorhanden. Selbiges gilt auch in anderen Bereichen, wie Werkstatt-Areal oder Vorhöfe.

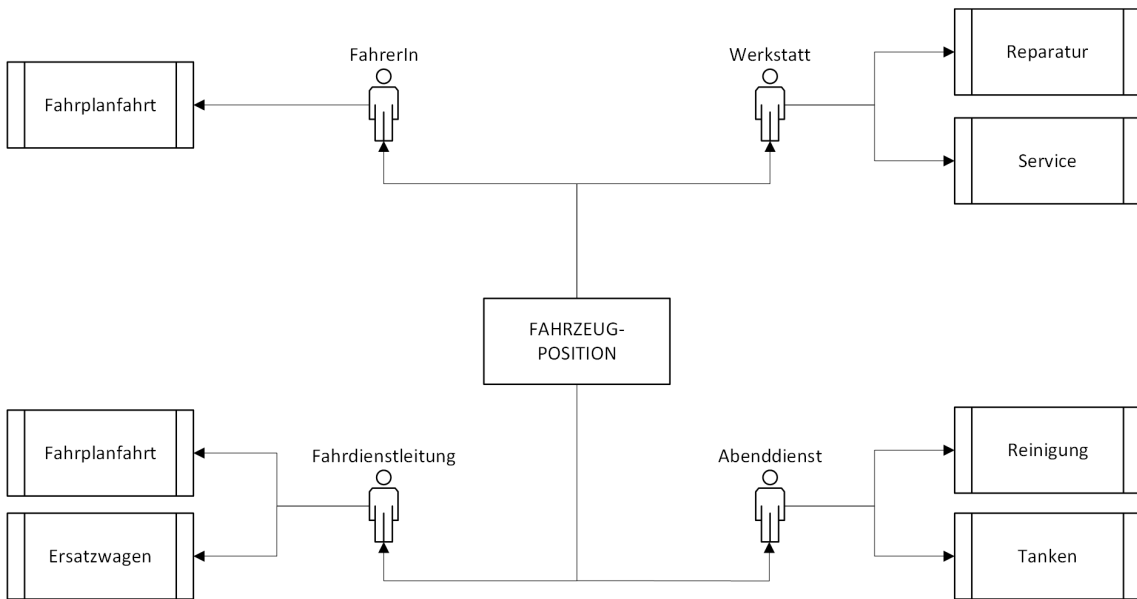


Abbildung 3.1: Übersicht BHM Fahrzeugposition mit Anwender.

Die Grafik 3.1 zeigt vereinfacht, für welche vier Hauptbenutzergruppen bei den Innsbrucker Verkehrsbetrieben eine genaue Fahrzeugposition am Betriebshofgelände von großer Bedeutung ist.

In den nachfolgenden Abschnitten erfolgt eine genauere Erklärung der wichtigsten Komponenten. Fuhrpark und Betriebshof, diverse Kommunikationstechniken, verschiedene Benutzergruppen, sowie weitere (externe) Anwendungen stellen den Kern des Betriebshofmanagements bei den IVB dar.

3.1.1 Fuhrpark und Betriebshof

Der momentane Fuhrpark der IVB besteht aus über 200 aktiven Fahrzeugen. Tabelle 3.1 gibt einen Überblick über den aktuellen Fahrzeugstand (April 2015) der IVB.

Art	Modell	Anzahl	Länge	Höhe	IBIS2	IBIS+	DigiTacho
Straßenbahn	Bombardier	32	27,0m	3,65m		x	x
Bus	Gelenk	78	18,0m	3,08m	x		x
	Solo	81	12,0m	3,36m	x		x
	Solo Überland	19	12,0m	3,36m	x		x
Sonstige	Einsatzwagen	5	5,0m	1,75m	x		
	Sonstige	1	0,0m	0,00m			

Tabelle 3.1: Fuhrpark und Ausstattung.

Ältere Fahrzeuge verfügen über das normale Integrierte Boardinformationssystem (IBIS) 2, neue Straßenbahnen besitzen bereits IBIS+. Sukzessive sollen alle Fahrzeuge mit IBIS+ nachgerüstet werden. Eine genauere Erklärung der Kommunikationssysteme erfolgt in dem nächsten Abschnitt 3.5.1.

Stationiert sind die Fahrzeuge an einem einzigen Standort, dem Betriebshof. Dieser besteht aus mehreren ober- und unterirdischen Teilbereichen, welche bereits durch die IR-Bakenortung zugeordnet werden können:

- OBus-Halle
- Straßenbahn-Halle
- Vorhof
- Hinterhof
- Werkstatt
- Lange Grube
- Waschstraße
- Tiefgarage

Die Tiefgarage gliedert sich in 3 Hallen mit insgesamt 16 Spuren, siehe Tabelle 3.2. Die Höhenangaben sind vom Boden bis zu den Längs- bzw. Querstreben der Decke gemessen. Die Anzahl der Solo- bzw. Gelenkbusse gilt für eine Standardbesetzung.

Halle Nr	Höhe	Fahrzeuge Max	Spur Nr	Gelenkbusse	Solobusse
I	3,81m	34	1	5	2
			2	5	2
			3	5	2
			4	4	0
			5	4	0
			6	5	0
II	3,53m	26	7	0	5
			8	0	7
			9	4	0
			10	0	5
			11	2	3
III	3,54m	31	12	0	7
			13	0	7
			14	0	7
			15	5	0
			16	5	0

Tabelle 3.2: Übersicht Tiefgarage.

Für diese Arbeit erfolgt die Vermessung und Positionsbestimmung in Halle 1. Abbildung 3.2 zeigt die Spuren 1 bis 3 von Halle 1 sowie die Säulenkonstruktion zwischen Spur 3 und 4.



Abbildung 3.2: Halle 1 mit abgestellten Fahrzeugen (Solobusse) und den Trennsäulen zwischen Spur 3 und 4.

Halle 1 stellt neben ihrer großen Stellfläche auch aufgrund der dortigen baulichen Gegebenheiten die umfangreichste Herausforderung dar. Es darf davon ausgegangen werden, dass eine erfolgreiche Lokalisierung in Halle 1 in der Folge auch in Halle 2 und 3 umgesetzt werden kann.

3.1.2 Kommunikation

Rechnergestütztes Betriebsleitsystem (RBL):

Dieses System stellt die wichtigste Schnittstelle zwischen Ortungssystem und einem funktionierenden BHM dar. Die von der Fa. Siemens VDO zugekaufte Software- und Hardwarelösung kümmert sich um die Informationsbeschaffung und Kommunikationsmöglichkeit zwischen dem Fahrer bzw. Fahrzeug und der Fahrdienstleitung. Das RBL steuert außerdem den rechnergestützten Fahrbetrieb sowie die dynamische Fahrgastinformation. [LRABB12], [SWB12]

Integriertes Boardinformationssystem (IBIS):

Das im Fahrzeug befindliche System ist für die Koordination der vom RBL zur Verfügung gestellten Funktionen zuständig. Das IBIS System ist so neben dem Sprechfunk auch für die Steuerung von Fahrgastinformationssystemen, Haltestellenansagen und Fahrscheinrentwerter verantwortlich. Weiters übernimmt IBIS die wichtige Steuerung der Streckeninfrastruktur, z.B. Lichtsignalanlagen oder Weichensteuerung.

Fahrzeuge mit IBIS+ unterscheiden sich dahingehend von normalen IBIS2 Fahrzeugen, dass sie über einen GPS-Empfänger und einen WLAN-Zugang verfügen. Die Datenversorgung (aktueller Fahrplan, Anzeigetexte, Haltestellendurchsagen, etc.) erfolgt dabei schneller, einfacher und automatisiert (zum Teil über Remote-Zugriff) per Wireless LAN.

Digitaler Tachometer:

Dieses Modul wurde von der Fa. Siemens VDO zugekauft. Der aktuelle Tachostand ist für ein effizientes Fuhrparkmanagement äußerst bedeutsam. Das System bietet zur Datenauslesung (dem Tachostand) auch eine WLAN Schnittstelle an. Jedes zur Personenbeförderung vorhandenes Fahrzeug der IVB verfügt über ein eingebautes DigiTacho-System. [VDO14]

3.1.3 Benutzer und Anwendungen

Fahrdienstleitung (FDL):

Die Fahrdienstleitung ist für einen zuverlässigen und verzögerungsfreien Ablauf hauptverantwortlich. Sie entspricht der Disposition und erstellt die Ausfahrtspläne, händigt die Fahrzeugpapiere an den Fahrdienst aus und sorgt tagsüber für ausreichend Ersatz- und Einschubfahrzeuge.

Für eine erfolgreiche Disposition benötigt die FDL einen Überblick in Echtzeit über die am Betriebshof befindlichen Fahrzeuge.

Werkstätte (WeSta):

Die Mitarbeiter der Werkstatt sind für die Instandhaltung von Fahrzeugen verantwortlich. Reparaturen werden durchgeführt, Ausstattungen erweitert oder neue Beklebungen aufgebracht. Neufahrzeuge werden in der Werkstatt mit zusätzlicher Hardware versehen und in das System integriert.

Obwohl der Fuhrpark der IVB laufend erweitert bzw. erneuert, müssen Werkstattaufenthalte professionell und genau geplant werden. Dazu benötigen WeSta-Mitarbeiter permanent einen Überblick über die am Betriebshof geparkten Fahrzeuge.

Fahrdienstpersonal:

Den Fahrern werden in der Früh von der FDL die Fahrzeugpapiere ausgehändigt. Im Falle einer Fahrplanfahrt sucht der Fahrer seinen Bus in der Tiefgarage, verlässt damit das Betriebshofgelände und fährt seinen Kurs im Liniennetz. Abends wird das Fahrzeug dann vom Fahrer im Betriebshof abgestellt.

Reinigungsdienst:

Diese Mitarbeitergruppe übernimmt den Bus bzw. die Straßenbahn Abends am Betriebshof. Das Personal weist jedem Fahrzeug, welches die Waschstrasse passiert, aufgrund seiner Ausstattungen und des Fahrplans für den kommenden Tag einen genauen Stellplatz in der Tiefgarage zu. Dort wird das Fahrzeug nach der Reinigung abgestellt. Je nach Fahrplanart (Wochentag, Sonntag, Ferien, etc.) erfolgt eine andere Aufstellung.

Automatische Garagierung:

Diese zukünftige Anwendung unterstützt den Reinigungsdienst bei der Wahl des Stellplatzes. Das System hat im Hintergrund mehrere Daten verfügbar: Fahrplan für den nächsten Tag, komplette Fahrzeugliste inklusive Ausstattungen, den Dienstplan, Informationen vom Fuhrparkmanagement, und so weiter.

3.2 Aufbau und Konzept

Im Zuge dieser Masterarbeit wird für das Ortungssystem die unterirdische Lokalisierung in einer Halle realisiert. Es gilt, im Unternehmen bestehende Ressourcen optimal zu nutzen und dadurch eine Lokalisierung der Fahrzeuge in der Tiefgarage zu ermöglichen.

Dafür werden bereits installierte Access Points in der Tiefgarage verwendet, welche für die Datenversorgung (Fahrpläne, Zielschildanzeigen, Tachostand, etc.) und Kommunikation (z.B. IBIS) der Fahrzeuge notwendig sind. Die Grundidee besteht darin, die Signalstärken der einzelnen Clients abzufragen. Ein Client entspricht dabei einem Fahrzeug. Jeder für die Ortung relevante Bus bzw. jede Straßenbahn besitzt mindestens ein eingebautes Netzwerk-Device, also ein WLAN-fähiges Gerät onboard. Pro Fahrzeugnummer lässt sich folglich eine MAC-Adresse matchen.

Als erster Schritt erfolgt eine Bestandsaufnahme in der Tiefgarage. Die bestehende WLAN-Infrastruktur wird erfasst und mittels Software ein Messmodell erzeugt. Mit einer gewissen Auflösung sind dadurch an jeder Stelle in der Tiefgarage die einzelnen Signalstärken der unterschiedlichen Access Points bekannt.

Bei der Ortung selbst kann über regelmäßiges Abfragen der Signalstärken des Clients und entsprechender Algorithmen einer MAC-Adresse (also einem Fahrzeug) dann der Standort mit ausreichender Genauigkeit und Eindeutigkeit zugewiesen werden.

Als zentrale Schnittstelle stellt sich das Betriebshofmanagement dar. Hier werden einerseits Fahrzeugdaten von autorisierten Usern eingepflegt und gewartet und andererseits auf eigenen Displays (InfoScreens) verteilt am Betriebsgelände Informationen über die Fahrzeugposition und den -status ausgegeben.

Das Ablaufdiagramm 3.3 zeigt das BHM als zentrales Element bei dem Zusammenspiel von Ortungssystem, Infoscreen und den einzelnen Akteuren bzw. Subsystemen.

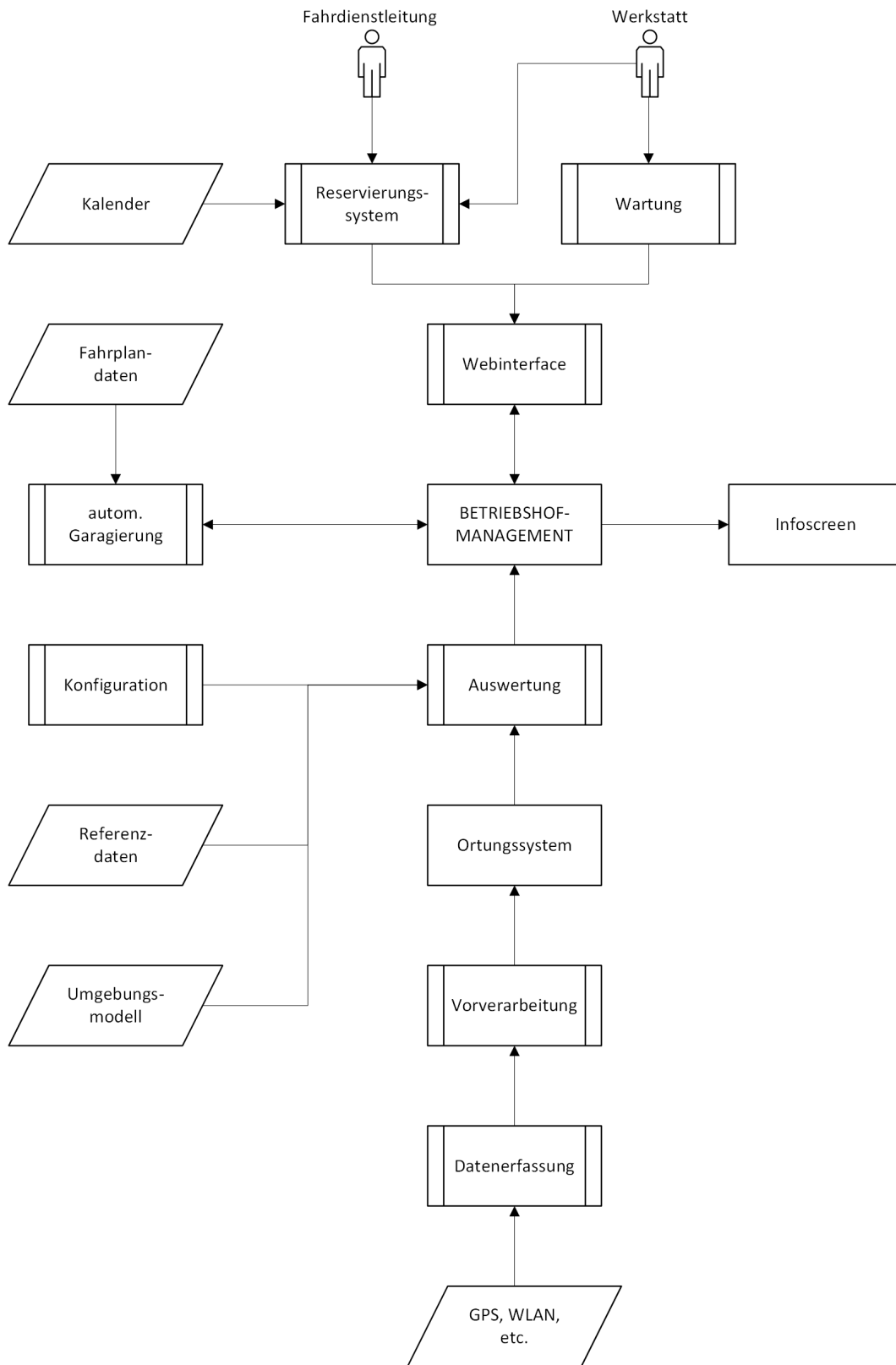


Abbildung 3.3: Ablaufdiagramm mit BHM als Schnittstelle.

Das Ortungssystem sammelt die Positionsbestimmungen unterschiedlicher Systeme (z.B. GPS im Outdoor-Bereich und über WLAN in der Tiefgarage). Bei der nachfolgenden Auswertung erfolgt die Nachbehandlung der Rohdaten mit Hilfe von Umgebungsmodellen und Referenzdaten. Erst dann gelangt die Positionsinformation an das Betriebshofmanagement. Diese Information wird vom BHM direkt an eigenen Infoscreens dargestellt. Den Mitarbeitern werden so permanent die Fahrzeugpositionen mitgeteilt. Die Fahrzeugdaten können im System einfach mit weiteren Informationen erweitert werden:

- Fahrzeugtyp: Solo oder Gelenkbus, etc.
- Fahrzeugstatus: verfügbar, reserviert, defekt, etc.
- Fahrzeugausstattung: Skiträger ja/nein, Fahrgastzählung ja/nein, etc.
- Aktualität: wie lange befindet sich das Fahrzeug schon auf dieser Position?
- Linie und Kurs (sofern sich das Fahrzeug auf Linienfahrt befindet)

Durch die verschiedenartige Darstellung der Fahrzeugpositionen erhält der Disponent den Betriebshof betreffend zum Beispiel rasch einen Überblick über:

- Wieviele Fahrzeuge vom Typ Gelenkbus sind im Vorhof vorhanden?
- Wie hoch ist die Auslastung in der Werkstatt?
- Wieviele betriebsbereite (nicht defekte) Fahrzeuge sind aktuell abgestellt?
- Seit wann steht der Solobus Nr 830 in der Tiefgarage?
- Wann hat die Straßenbahn Nr 32 den Betriebshof verlassen?

Über ein Webinterface kann die Datenbank gewartet werden. Neue Fahrzeuge werden hinzugefügt und die jeweiligen Ausstattungen zugewiesen. Die Fahrdienstleitung und die Werkstatt kann über ein eigenes Reservierungssystem mit hinterlegtem Kalender die Fahrzeuge reservieren (z.B. für Ersatzfahrten oder Servicearbeiten). Durch dieses System wird eine bessere Kommunikation zwischen den beiden Arbeitsbereichen garantiert.

Beim Design des BHM wird großen Wert darauf gelegt, möglichst offen für weitere Informationen und Schnittstellen zu sein. Eine gute IT-Infrastruktur in einem Verkehrsunternehmen zeichnet eine hohe Vernetzung unterschiedlicher Soft- und Hardware aus.

So ist die genaue Stellplatzinformation beispielsweise auch für eine automatische Garagierung notwendig. Mit hinterlegtem Ausfahrtsplan können die Fahrzeuge Abends in der richtigen Reihenfolge abgestellt werden.

Durch das permanente Wissen der Fahrzeugposition sind beim Betriebshofmanagement weitere Entwicklungen denkbar. So könnte zukünftig neben der Garagierung auch eine Anbindung an das bereits vorhandene Fuhrparkmanagement der Werkstätte erfolgen. Damit würde das Flottenmanagement berücksichtigt werden und beispielsweise eine bewusste Steuerung der Sollaufleistung gewisser Fahrzeuge stattfinden.

Für eine bessere Kommunikation zwischen FDL und WeSta könnte ein Reservierungssystem für Fahrzeuge implementiert werden. Sobald ein Bus oder eine Straßenbahn in einem definierten Bereich abgestellt wird, erfolgt eine Benachrichtigung an den Benutzer.

3.3 Ortungsverfahren

Wie bereits unter Kapitel 2.2 genauer beschrieben, gibt es mehrere Möglichkeiten für die Positionsbestimmung. Aufgrund der Gegebenheiten bei den Innsbrucker Verkehrsbetrieben werden nachfolgend die Methoden *Cell of Origin* und *Fingerprinting* genauer analysiert.

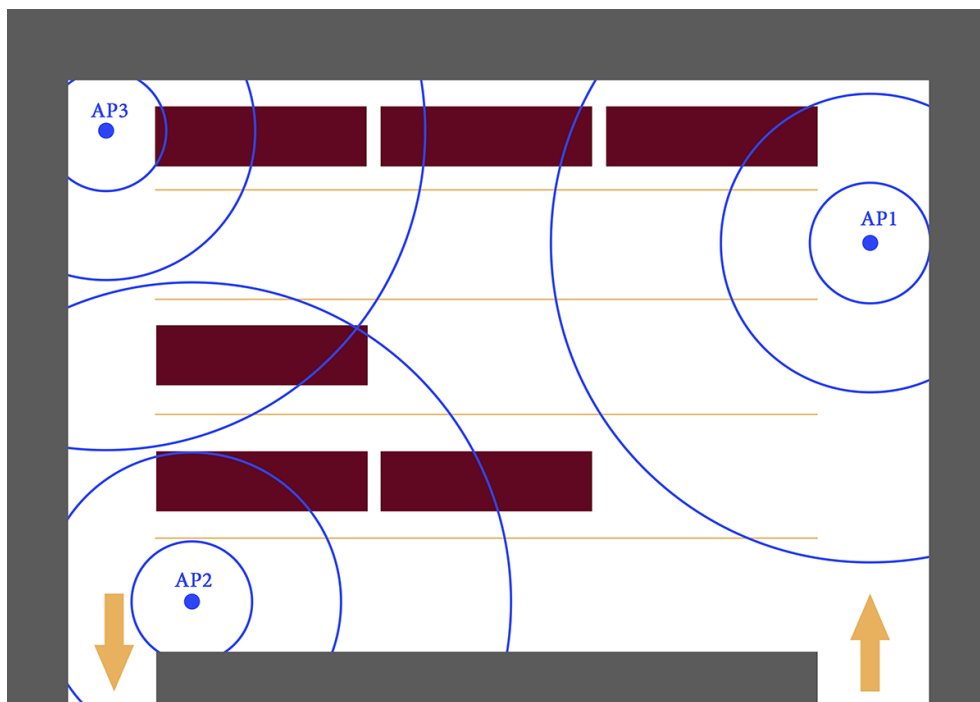


Abbildung 3.4: Tiefgarage mit Access Points AP1, AP2 und AP3.

Abbildung 3.4 zeigt eine fiktive Abstellfläche in einer Tiefgarage. Diese Halle bietet Platz für 15 Fahrzeuge auf fünf Fahrspuren. Weiters soll die Halle drei Access Points (AP1, AP2 und AP3) besitzen. Sechs abgestellte Fahrzeuge befinden sich aktuell im Ortungsbereich.

3.3.1 Cell of Origin

Soll nun die Position vom Fahrzeug unten links bestimmt werden, kann mittels Cell of Origin-Methode erkannt werden, dass Access Point AP2 das stärkste Signal an den Client liefert.

Das Fahrzeug wird sich aufgrund der Netzwerkkonfiguration automatisch mit diesem Access Point verbinden. Durch diese Information erfolgt eine allererste grobe Positionsbestimmung.

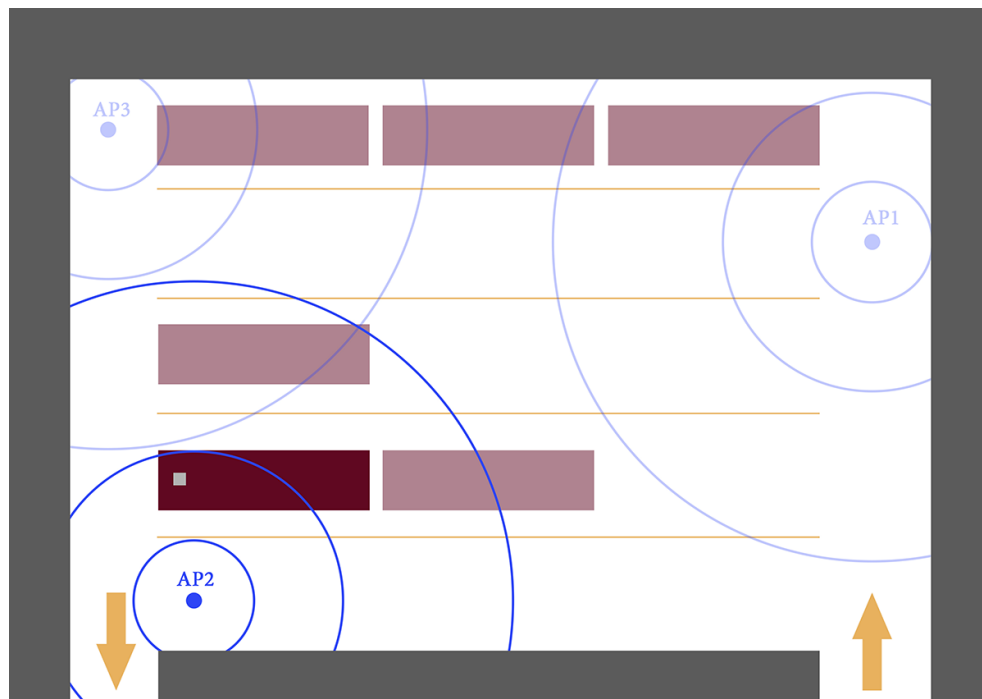


Abbildung 3.5: Tiefgarage: erste Näherung durch CoO.

In Abbildung 3.5 ist die CoO Methode in der Tiefgarage dargestellt. Eine eindeutige Positionszuordnung kann hierbei noch nicht erfolgen. Der geringen Genauigkeit steht allerdings eine sehr schnelle Lokalisierung gegenüber. Problemematisch erweisen sich Ortungsbereiche, wo die Zuordnung zu einem Access Point nicht eindeutig ist, beispielsweise in der Mitte der Garage. Hier ist es mittels CoO nur schwer möglich, eine Position zuzuweisen.

3.3.2 Triangulation mittels Received Signal Strength Indication

Im nächsten Schritt werden nun die genauen Signalstärkewerte der drei Access Points herangezogen. Über Triangulation kann dann auf die Position geschlossen werden. Dies setzt allerdings voraus, dass sich ein Client entweder gleichzeitig oder rasch hintereinander bei allen verfügbaren Access Points anmelden kann. Dazu bedarf es einer entsprechenden WLAN-Konfiguration.

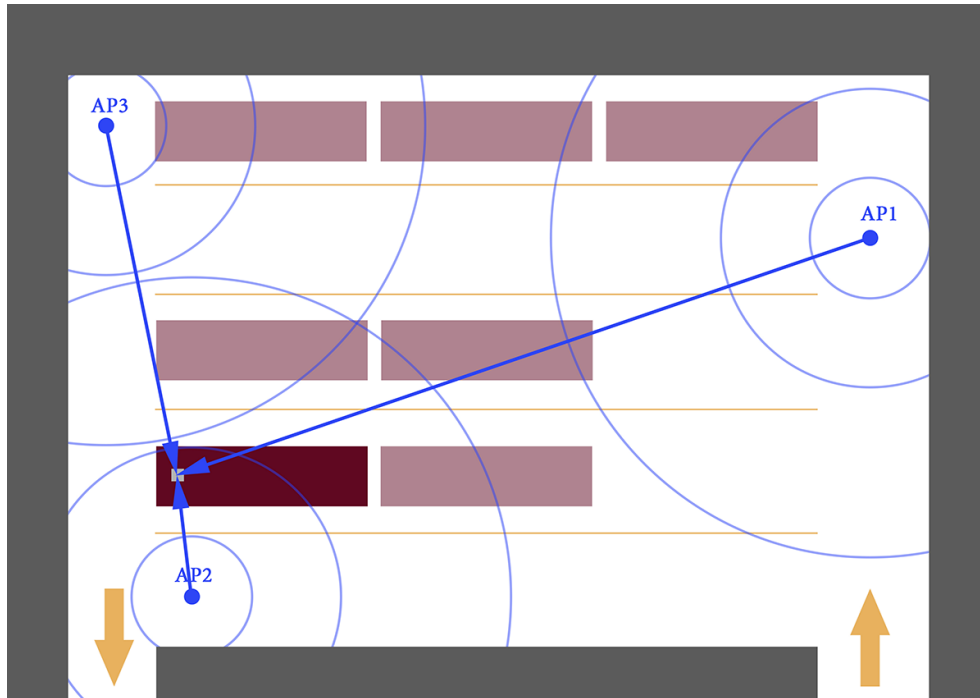


Abbildung 3.6: Tiefgarage: Auswertung der RSSI.

In Abbildung 3.6 gut ersichtlich: durch ein in der Zwischenzeit in die Tiefgarage eingefahrenes Fahrzeug (sowie den daraus resultierenden Reflexionen bzw. Absorptionen) ist eine deutlich reduzierte empfangbare Signalstärke von AP1 beim zu ortenden Fahrzeug zu erwarten.

Gewisse Signalabschwächungen lassen sich jedoch durch die Ein-/ Ausfahrtslogik bzw. die Vergangenheit eliminieren. Bei der schlussendlichen Zuordnung eines Stellplatzes können Plausibilitätschecks durchgeführt werden. Beispielhaft: aufgrund der baulichen Gegebenheiten stehen die einzelnen Fahrzeuge sehr dicht neben- und hintereinander. Weiters wird die Garage nach dem First In - First Out (FIFO) Prinzip betrieben. Das Fahrzeug hinter zum zu Ortenden kann also maximal gleichzeitig mit dem aktuell Ausgewählten in die Garage eingefahren sein.



Abbildung 3.7: Halle 1 mit abgestellten Fahrzeugen in Spur 1 und 3.

Die Abbildung 3.7 zeigt eine beispielhafte Garagierung in der Tiefgarage. Die Fahrzeuge sind dicht neben- und hintereinander geparkt auf den Spuren 1 und 3 in Halle 1.

3.3.3 Fingerprinting

Zur Steigerung von Genauigkeit und Ortungsgeschwindigkeit kommt als nächstes das sogenannte *Fingerprinting* zum Einsatz. Hierfür wird die Fläche der Tiefgarage in einzelne, gleich große Segmente unterteilt. Über eine spezielle Software (Wireless Site Survey) werden vorab für jede Position in der Tiefgarage die Signalstärken von jedem empfangbaren Access Point ermittelt und tabellarisch gespeichert.

In Folge werden nun die vom Fahrzeug gemessenen Signalstärken aller Access Points mit der Tabelle verglichen und dem Segment mit der höchsten Übereinstimmung zugeordnet. Die Zellgröße wird dabei durch die Messgenauigkeit bei der Initialisierungsphase bestimmt bzw durch Anwendung von algebraischen Verfahren verändert.

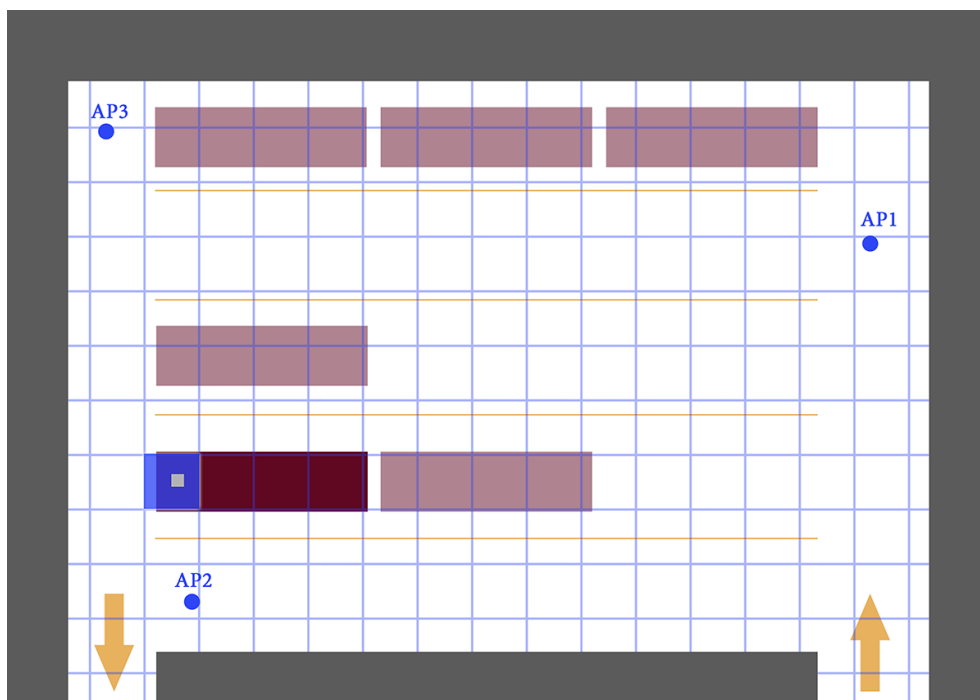


Abbildung 3.8: Tiefgarage: Anwendung von Fingerprinting.

Abbildung 3.8 zeigt nun die Anwendung der beschriebenen Fingerprinting Methode in der Tiefgarage.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass eine Kombination der einzelnen Ortungsprinzipien und die Miteinbeziehung von vergangenen Ortungsdaten vernünftig erscheint.

3.4 Initialisierungsphase

Als ersten Schritt gilt es, die Tiefgarage zu vermessen. An welcher Stelle werden welche Signale mit welcher Stärke empfangen? Welche Genauigkeit, welcher Raster muss bei der Kalibrierungsphase verwendet werden? Welche Reflexionen treten auf? Wie verhält sich eine leere Garage zur vollgeparkten? Wo müssen weitere Access Points installiert werden?

Zur Klärung dieser Fragen wird eine Site Survey durchgeführt. Mit Hilfe einer Software wird die Tiefgarage in einem frei wählbaren Raster komplett vermessen. Dadurch werden Funkschwachstellen in der Garage aufgezeigt, welche durch zusätzliche Installation von Access Points behoben werden kann. Die einzelnen Sendekanäle können aufgrund der Messdaten optimal gewählt und Signalüberlappungen minimiert werden. Die Genauigkeit dieser Initialisierungsphase ist von großer Bedeutung für die Exaktheit der darauf aufbauenden Ortung (z.B. Fingerprinting).

3.5 Lokalisierungsphase

Während der Lokalisierung gilt es, alle vorhandenen Signalstärken zu sammeln. Über ein Netzwerkprotokoll werden permanent alle Clients von allen WLAN Access Points im Netzwerk abgefragt. Diese umfangreiche Datenmenge wird nach den MAC-Adressen von Fahrzeugen und relevanten Access Points gefiltert und zwischengespeichert.

Das nachfolgende Modul kümmert sich um deren Verwertung. Es versucht aus den Datensätzen eine Positionsbestimmung zu ermitteln. Diese Informationen werden dem User schließlich über das Betriebshofmanagement zur Verfügung gestellt.

Grundsätzlich lässt sich das Design in drei grobe Bereiche aufteilen:

- Fetcher: Datensammlung
- DataCruncher: Datenverwertung
- Betriebshofmanagement: Datendarstellung

Abbildung 3.9 zeigt vereinfacht, wie die per Simple Network Management Protocol abgefragten RSSI-Informationen über den Fetcher und den DataCruncher schließlich an das BHM gelangen.

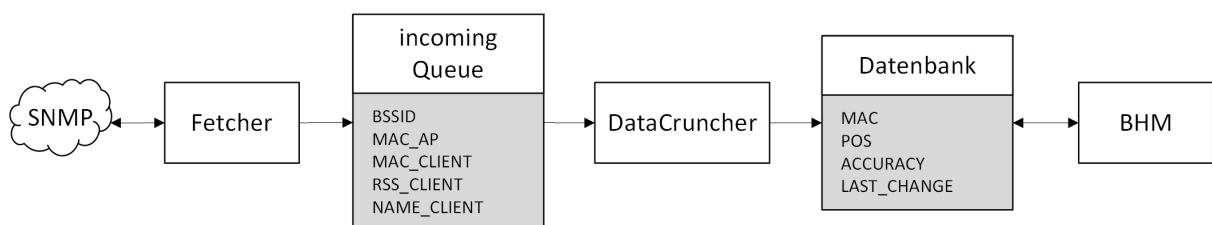


Abbildung 3.9: Design Ortungssystem.

Die einzelnen Module sowie die Incoming Queue und das Datenbankmodell werden in den nachfolgenden Abschnitten genauer erklärt.

3.5.1 Kommunikation

Die Kommunikation mit den Clients erfolgt über SNMP. Dieses Protokoll garantiert eine zuverlässige und schnelle Kommunikation, welche gefordert ist. Allerdings müssen dazu alle am Betriebshof installierten Access Points diesen Protokollstandard unterstützen.

Über einen zentralen SNMP-Manager ist es dadurch möglich, an den Access Points laufend die Signalstärken der einzelnen angemeldeten WLAN-Devices der Fahrzeuge abzufragen. Dazu müssen die bereits unter Punkt 2.4 erläuterten MIBs und OIDs entsprechend gewählt und der Abfrageprozess automatisiert werden. Weiters sind adäquate Anpassungen am Netzwerk der Verkehrsbetriebe notwendig.

3.5.2 Fetcher

Der *Fetcher* ist als Cronjob oder Daemon implementiert, er wird also in einer Endlosschleife regelmäßig aufgerufen. Das Modul kommuniziert mit dem SNMP Manager und fragt alle relevanten Clients der Access Points in der Tiefgarage ab. Das Zeitintervall dieser Scans wird dabei dynamisch bestimmt - je nach Server-Auslastung und Anzahl vorhandener Fahrzeuge in der Tiefgarage.

Als Retourwert bekommt der Fetcher geliefert:

- Basic Service Set Identification (BSSID) vom Access Point
- MAC-Adresse vom AP
- MAC-Adresse vom Client
- RSSI vom Client
- NAME vom Client (optional)

Wurde ein RSSI von einem Client zugehörig zu einem Access Point in der Tiefgarage erkannt, werden die Informationen abgespeichert. Fortlaufend werden diese Daten vom Fetcher in einer Incoming Queue bzw. Datenbank gebuffert und zur weiteren Bearbeitung zur Verfügung gestellt.

In Abbildung 3.10 ist die Funktionsweise des Fetchers in einem Ablaufdiagramm ersichtlich. Bei Funktionsaufruf werden zu allererst die Programmparameter eingelesen. Diese Konstanten inkludieren neben den MIBs und OIDs auch die der Tiefgarage zugeordneten Access Points.

Als nächstes folgt der SNMP Walk. Während dieser Schleife werden laufend vom SNMP Manager die Clients der Access Points abgefragt. Ist ein Datensatz von Interesse dabei, werden die Informationen an das Datenbanksystem weitergegeben und gespeichert. Schritt für Schritt werden alle Clients abgefragt und kontrolliert.

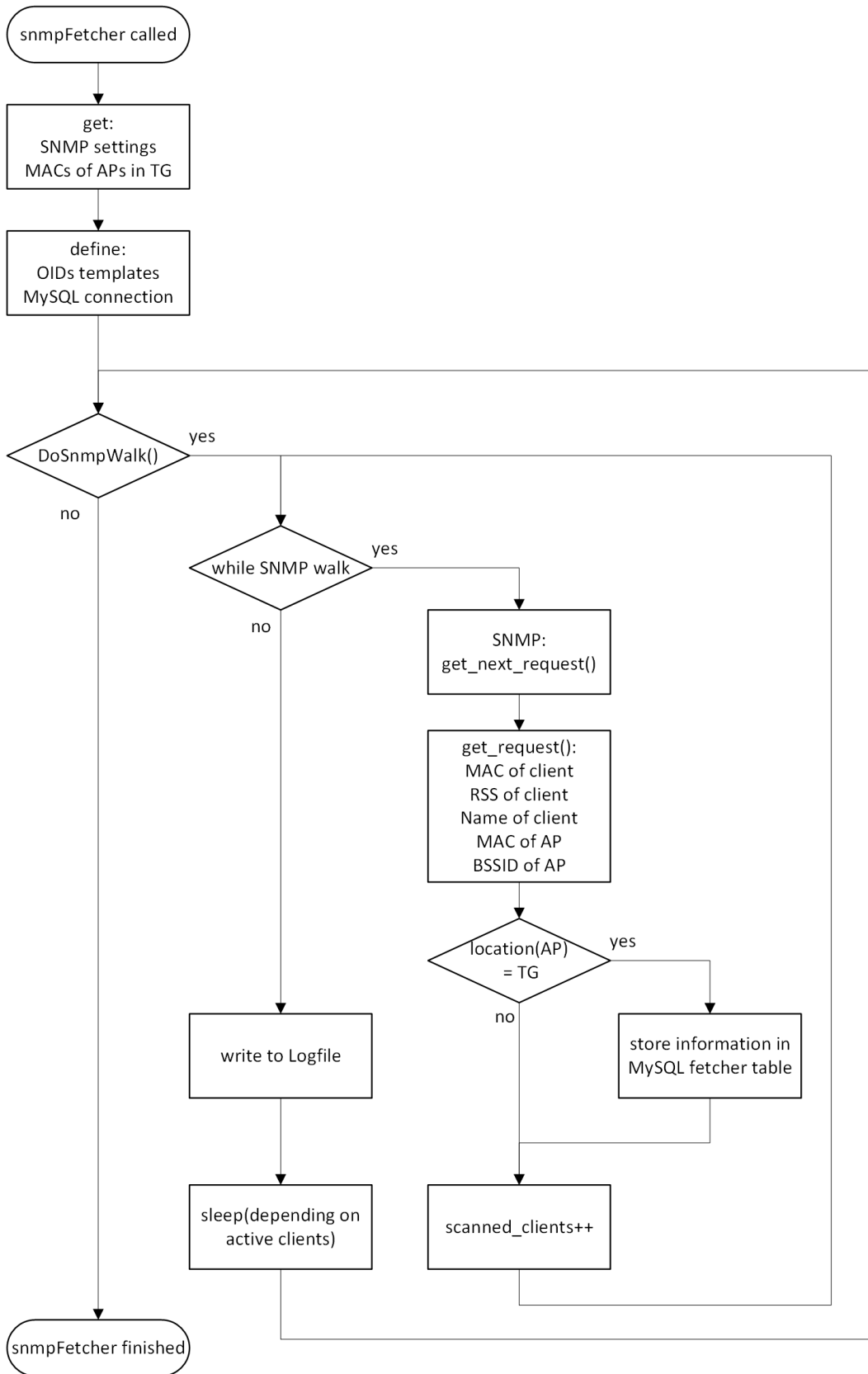


Abbildung 3.10: Design SNMP Fetcher Modul.

Nach einem vollständigen SNMP Walk folgt eine Entlastungspause. Diese ist einerseits abhängig davon, wieviele Clients sich aktuell im Netzwerk befinden und andererseits, wieviele davon sich in der Tiefgarage befinden und von Interesse sind. Abhängig davon wird die Pause bis zum nächsten Walk bestimmt.

3.5.3 DataCruncher

Der *DataCruncher* wird als Daemon implementiert und pollt auf die Daten, welcher der Fetcher in der Incoming Queue ablegt. Die abgefragten Signalstärkewerte pro MAC-Adresse werden vom DataCruncher analysiert (Kausalitätsprüfung) und ausgewertet. Nach Möglichkeit erfolgt eine Positionszuweisung.

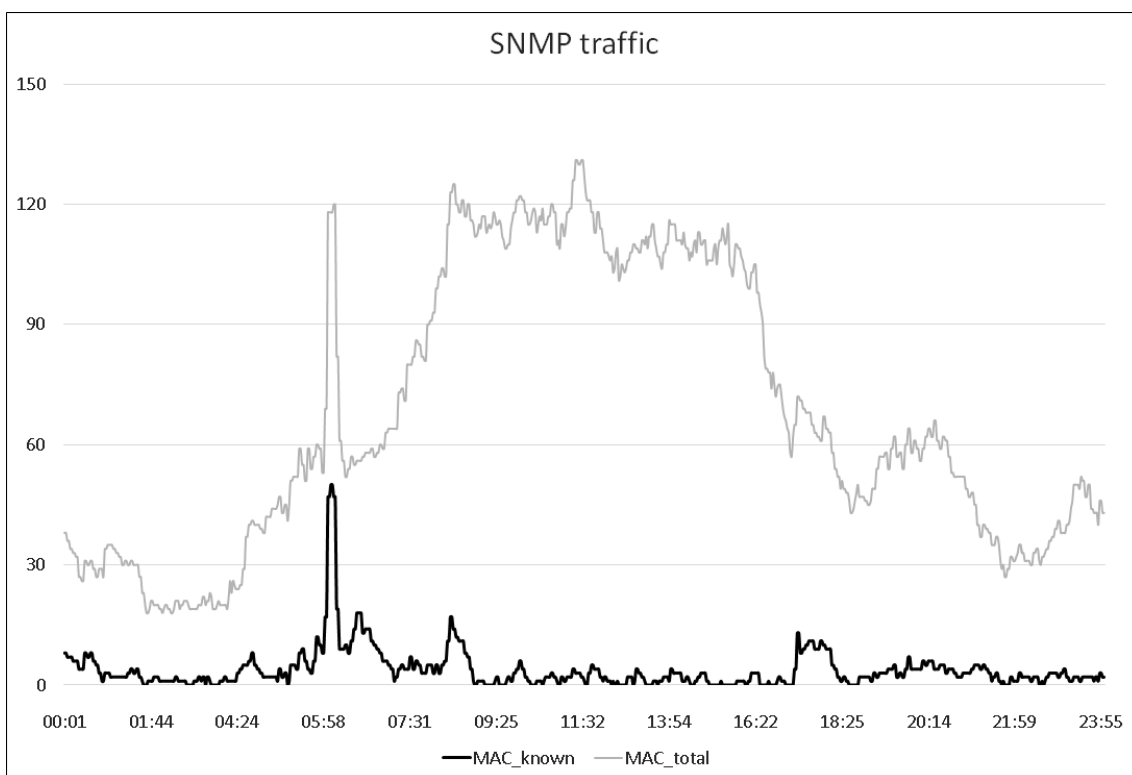


Abbildung 3.11: Auslastung SNMP Netzwerk. Die dunkle Linie zeigt die Anzahl der Traffic-Teilnehmer, welche der Tiefgarage zugeordnet werden.

Das Diagramm in Abbildung 3.11 zeigt die zeitliche Auslastung des WLAN-Netzwerkes der IVB an einem typischen Tag. Die helle obere Linie repräsentiert alle im WLAN erkannten SNMP-fähigen Clients. Die dunkle Linie stellt die davon der Tiefgarage zugeordneten Geräte dar.

Sehr deutlich erkennbar ist die Frühspitze um 6:00 Uhr. Zu dieser Zeit verlassen viele Busse die Tiefgarage und beginnen mit der Fahrplanfahrt. Der Gesamt-Traffic steigt im

Verlaufe des Tages auf etwa 120 Teilnehmer an und nimmt ab 16 Uhr (Büroschluss) wieder ab. Bei den Fahrzeugen der Tiefgarage ist die Spitze zur Abendzeit gegen 17:30 Uhr zwar erkennbar, sie fällt aber flacher aus. Dies lässt sich durch die schrittweise Reinigung der Fahrzeuge und deren anschließende Garagierung erklären.

Die Lokalisierung selbst wird über CoO und Fingerprinting durchgeführt. Die Verfahren wurden bereits unter Punkt 3.3 genauer beschrieben. Bei einer erfolgreichen Bestimmung werden die Positionsdaten an die Schnittstelle zum Betriebshofmanagement weitergegeben. Über ein Datenbanksystem wird die aktuelle Position eines Fahrzeuges aktualisiert.

Die Fahrzeug-Tabelle wird um folgende Felder erweitert:

- MAC: MAC-Adresse vom WLAN-Modul im Fahrzeug
- POS: Positionskoordinaten vom Fahrzeug am Betriebshof
- ACCURACY: Genauigkeit der berechneten Lokalisierung
- LAST_CHANGE: seit wann befindet sich das Fahrzeug auf dieser Position

Nachdem die Tiefgarage zu Stoßzeiten relativ schnell gefüllt bzw. geleert wird, erfolgt eventuell eine Parallelisierung der einzelnen Prozesse. Dabei werden Arbeitspakete erstellt und in eigenen Worker-Prozessen abgearbeitet.

Das nachfolgende Ablaufdiagramm in Abbildung 3.12 zeigt das grundsätzliche Design vom DataCruncher. In diesem Fall ist die Abfrage der Position von einem einzigen Fahrzeug dargestellt.

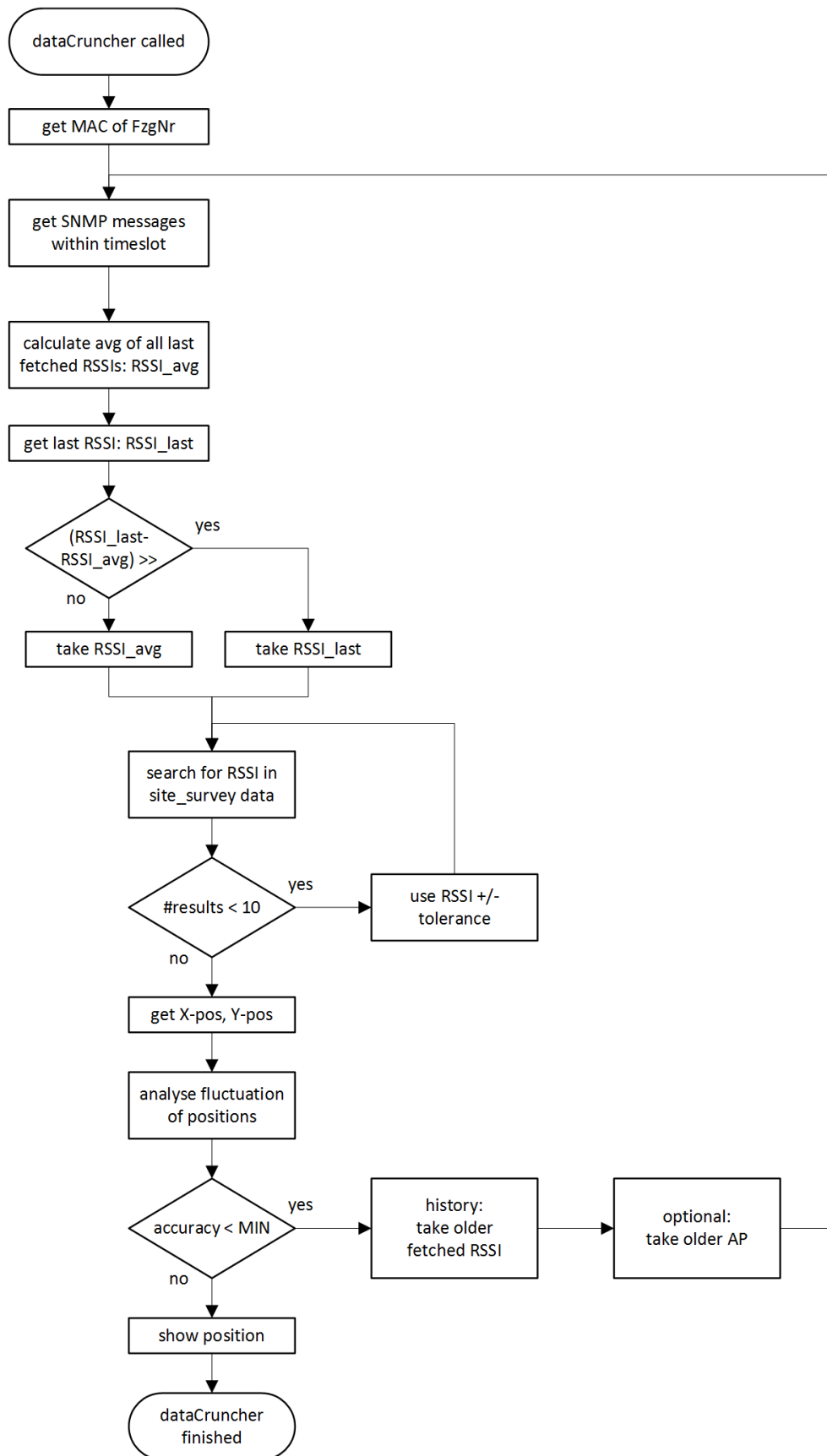


Abbildung 3.12: Design DataCruncher Modul.

Als erster Schritt wird die Fahrzeugnummer dem Programm übergeben. Über die Datenbank wird die ID und die MAC-Adresse vom Fahrzeug bestimmt. Mit dieser MAC-Adresse werden nun die letzten SNMP Meldungen durchsucht. Für das Programm sind dabei nur die letzten Messages innerhalb eines definierbaren Zeitraumes interessant. Das heißt zum Beispiel zehn Minuten vor der letzten empfangenen Meldung des Fahrzeuges. Diese SNMP-Meldungen werden analysiert und die RSSI durchsucht. Ein Mittelwert wird erstellt und die Schwankungen dazu bestimmt.

Weiters erfolgt eine Gewichtung - der letzte empfangene Signalstärkewert ist der bedeutendste. Je nach Schwankung wird nun der RSSI-Durchschnittswert verwendet oder nur der allerletzte Messwert. Mit diesem RSSI-Wert und dem zugeordneten Access Point (die MAC-Adresse dessen) werden jetzt die Daten der Site Survey durchsucht. Gibt es bereits erfolgreiche Ergebnisse bei einer exakten Suche, so werden die Koordinaten ausgelesen. Ansonsten erfolgt eine Anpassung des zu suchenden RSSI-Wertes mittels konfigurierbarer Toleranzen.

Die von der Site Survey errechneten Daten werden in einem letzten Schritt auch noch analysiert. Treten zu große Schwankungen auf (d.h. mehrere Positionen wären möglich), erfolgt eine Untersuchung der Ergebnisse. Eventuell kommen dann ältere Messwerte des Fahrzeuges zum Zug, oder es können aufgrund logischer Gegebenheiten vorgeschlagene Positionen verworfen werden.

Im Abschluss erfolgt noch eine Validierung der bestimmten Position und die Weitergabe an entsprechende Schnittstellen.

3.5.4 Betriebshofmanagement

Im Betriebshofmanagement werden dem Anwender laufend die Positionen der Fahrzeuge im Betriebshof zur Verfügung gestellt. Egal, ob die Standort-Information oberirdisch direkt per GPS ermittelt wird, oder die Ortung in der Tiefgarage über WLAN erfolgt, im Datenbankmodell ist für jedes Fahrzeug eine Position hinterlegt. Das eigene, unterirdische Koordinatensystem wird dabei auf das oberirdische GPS-System referenziert.

Weiters wird die Genauigkeit bzw. Messunsicherheit und die Aktualität der Information pro Fahrzeug miterfasst. Im Ausnahmefall hat außerdem jeder Mitarbeiter mit entsprechender Befugnis die Möglichkeit, Fahrzeugpositionen händisch im Betriebshofmanagement zu korrigieren.

Auf den Infoscreens werden die Fahrzeugpositionen tabellarisch ausgegeben. Abbildung 3.13 zeigt einen Screenshot vom BHM-Infoscreen der IVB. Rot markierte Fahrzeuge deuten auf alte Datensätze hin - das Fahrzeug wurde über einen längeren Zeitraum (im BHM definierbar) nicht bewegt.

The screenshot shows a software interface for 'ivb.betriebshofmanagement'. At the top, there is a header bar with the text 'ivb.betriebshofmanagement' on the left and 'wir bewegen die stadt.' on the right. Below the header, the main content area is divided into four columns, each with a header 'FZGNR POSITION'. Each column contains a list of vehicle numbers and their corresponding positions. The data is as follows:

FZGNR POSITION	FZGNR POSITION	FZGNR POSITION	FZGNR POSITION
410 Liniennetz (O/17)	429 Vorhof, Werkstatt	618 Hinterhof, Werkst	835 Liniennetz (R/2)
411 Vorhof, Werkstatt	430 Vorhof, Werkstatt	619 Liniennetz (A/3)	836 Vorhof, Werkstatt
412 Liniennetz (O/6)	601 Vorhof, Werkstatt	620 Liniennetz (H/6)	837 Liniennetz (4/4)
413 Liniennetz (O/12)	602 Liniennetz (J/1)	621 Liniennetz (T/5)	838 Liniennetz (O/9)
414 Liniennetz (O/14)	603 Liniennetz (J/6)	622 Liniennetz (A/5)	839 Liniennetz (R/6)
415 Liniennetz (F/3)	604 Liniennetz (J/4)	623 Liniennetz (H/1)	840 Liniennetz (R/12)
416 Liniennetz (O/2)	605 Waschstrasse	624 Waschstrasse	841 Liniennetz (O/16)
417 Liniennetz (O/7)	606 Liniennetz (J/5)	625 Liniennetz (H/5)	842 Liniennetz (O/10)
418 Liniennetz (F/2)	607 Vorhof, Werkstatt	626 Liniennetz (O/31)	843 Liniennetz (O/15)
419 Liniennetz (O/11)	608 Liniennetz (A/2)	627 Linienn. (LK/22)	844 Liniennetz (R/11)
420 Liniennetz (F/6)	609 Liniennetz (T/7)	628 Liniennetz (J/7)	845 Liniennetz (R/10)
421 Hinterhof, Werkst	610 Liniennetz (H/3)	629 Liniennetz (C/1)	846 Liniennetz (R/9)
422 Liniennetz (F/1)	611 Waschstrasse	630 Liniennetz (1/81)	847 Liniennetz (O/1)
423 Tiefgarage	612 Liniennetz (H/2)	631 Waschstrasse	848 Liniennetz (O/8)
424 Liniennetz (F/5)	613 Liniennetz (R/13)	830 Liniennetz (R/5)	849 Tiefgarage
425 Liniennetz (F/4)	614 Liniennetz (S/1)	831 Liniennetz (R/7)	850 Liniennetz (O/13)
426 Liniennetz (O/5)	615 Vorhof, Werkstatt	832 Liniennetz (R/8)	868 Liniennetz (4/20)

Abbildung 3.13: BHM: Screenshot Infoscreen.

Je nach Anwendungsfall können weitere Informationen eingeblendet oder unterschiedliche Filter angewandt werden - beispielsweise das Ausblenden gewisser Fahrzeugtypen. Für die Disponenten und die Mitarbeiter in der Werkstatt erfolgt die Standortausgabe graphisch. So wird einerseits ein schneller Überblick gewährleistet und andererseits bleibt die Darstellung bei voller Informationsausgabe für den User noch erfassbar.

3.6 Zusammenfassung

Es zeigt sich, dass die Komplexität dieser Aufgabenstellung von mehreren Faktoren abhängig ist:

- Größe der vorhandenen Stellfläche
- Anzahl der Fahrzeuge pro Fläche
- Anzahl der empfangbaren Access Points an jeder Position
- baulichen Gegebenheiten
- Schnelligkeit der Ortung

Die vielversprechendste Art und Weise der Lokalisierung ist eine Kombination der beschriebenen Methoden. Durch Cell of Origin erfolgt die erste, schnelle Zuordnung des Fahrzeuges. Mittels Fingerprinting wird dann ein genauerer Zellenbereich definiert. Und um die Eindeutigkeit zu gewährleisten, wird das Ortungsergebnis am Ende noch auf Kausalität überprüft, z.B. ob an der berechneten Stelle nicht bereits ein Fahrzeug steht oder ob das Fahrzeug mit seiner definierten Länge und Breite an dem Stellplatz überhaupt parken kann.

Weiters geht hervor, dass die Genauigkeit der Ortung stark von der Qualität der Rohdaten abhängig ist. Je genauer die geometrischen Daten vorhanden sind und das Einmessen der Signalstärkenwerte (Initialisierungsphase für Fingerprinting) per Site Survey erfolgt, desto exakter die Positionsbestimmung des Fahrzeuges.

Auch scheinen die Optimierungsmöglichkeiten recht vielseitig und umfangreich. Dazu bedarf es allerdings einiger Messwerte mit welchen eine Korrektur stattfinden kann.

Kapitel 4

Implementierung

Das folgende Kapitel beschreibt die Realisierung des Designs von Kapitel 3. Zuerst wird der Ablauf der Umsetzung erklärt und die Test- bzw. Laufzeitumgebung definiert. Beginnend mit der WLAN Site Survey erfolgen erste praktische Messungen. Aufgrund der Ergebnisse können weitere Schritte geplant werden. Über die SNMP-Implementierung erfolgt die Datensammlung, welche im darauf folgenden Punkt zur Positionsbestimmung führt. Abschließend werden die Datenausgabe im Betriebshofmanagement dargestellt und die Ergebnisse zusammengefasst.

4.1 Ablauf

Als erster Schritt erfolgt eine vermessungstechnische Bestandsaufnahme der Tiefgarage bei den Verkehrsbetrieben. Die Reichweite der einzelnen Access Points wird abgeklärt, eine erste WLAN-Messung (Site Survey) durchgeführt. Auf Basis dieser Ergebnisse werden weitere Access Points installiert und zusätzliche Tests durchgeführt. Für die Kommunikation mit den Fahrzeugen kommt das Simple Network Management Protocol zum Einsatz. Die MAC-Adressen der Clients werden dem jeweiligen Fahrzeug zugeordnet. Dazu dient das bereits für das Betriebshofmanagement verwendete Datenbanksystem. Die Empfangsunterschiede zwischen den einzelnen Fahrzeugen werden durch die Messung bei Referenzstellen gemessen und korrigiert.

Nachdem alle benötigten Access Points installiert sind, wird der Bereich unter verschiedenen Bedingungen (leere und volle Garage) eingemessen. Signalstärken der einzelnen Punkte in der Tiefgarage werden erfasst und in die Datenbank eingepflegt. Parallel dazu wird die SNMP Abfrage automatisiert. Im nächsten Schritt erfolgt die Ortung. Die gemessene Signalstärke (RSSI) wird mit den Messdaten verglichen und mit Hilfe von weiteren Algorithmen erfolgt eine Positionsbestimmung.

Die Anzeige der Position erfolgt dann schlußendlich über das Betriebshofmanagement. Über geeignete Webtools werden die Informationen dem Mitarbeiter möglichst kompakt und übersichtlich dargestellt.

4.2 Laufzeitumgebung

4.2.1 Soft- und Hardwareumgebung

Als Laufzeitumgebung dient ein virtualisierter Windows Server 2012 R2 Standard 64 Bit. Als Hardware kommen eine Intel Xeon E5-2697 v2 CPU sowie SSD Harddisks und bis zu 16GB RAM zum Einsatz. Auf diesem Server ist mittels XAMPP (Version v3.2.1) ein Apache Webserver (2.4.10) sowie eine MySQL 5.6.21 Datenbank plus phpMyAdmin (Version 4.2.11) installiert. Zur Realisierung der SNMP-Abfragen wurde Strawberry Perl 5 in der Version 20 (v5.20.1) installiert. Die Automatisierung dieses Perl Scripts erfolgt mit dem Windows Task Scheduler.

Die WLAN Hardware in der Tiefgarage stammt ausschließlich vom Hersteller Ruckus Wireless. Die Rolle des SNMP Managers übernimmt der Ruckus ZoneDirector 3025. Als Access Points kommen Modelle der Serie ZF7343, ZF7300 und ZF7352 zum Einsatz. Eine genauere Beschreibung folgt unter Punkt 4.3.

Für die Durchführung der WLAN-Vermessung wird die Software AirMagnet Survey Express Version 8.7 (Build 35810) vom Hersteller Fluke Networks verwendet. Die Messungen selbst werden auf einem HP EliteBook Revolve 810 Tablet mit Windows 8.1 Pro 64 Bit erledigt. Als externe WLAN-Antenne wird ein externer Proxim Orinoco 8489 802.11 A/B/G/N USB-Adapter an einem 1m langem Kabel eingesetzt.

4.2.2 Tiefgarage

Die Tiefgarage bei den Innsbrucker Verkehrsbetrieben wird in 3 Hallen mit insgesamt 16 Spuren eingeteilt.

Die in dieser Masterarbeit durchgeführten Ortungsuntersuchungen und -realisierungen werden in Halle 1 umgesetzt. Dieser Teil der Tiefgarage besteht aus den Spuren 1, 2, 3 und 4, 5, 6 und stellt wie bereits erwähnt die größte Herausforderung dar.

Abbildung 4.1 zeigt den Grundriss der gesamten Tiefgarage bei der IVB.

Die Zufahrt zur Garage befindet sich im Nordwesten, dem rechten unteren Eck am Plan. Die Ausfahrt erfolgt im Nordosten. In der Tiefgarage existiert eine generelle Einbahnregelung, d.h. die Fahrzeuge werden nach dem First In - First Out (FIFO) Prinzip abgestellt und ausgefahren. Das Ausparken eines vorne und hinten eingeparktem Fahrzeuges ist nur in Notfällen möglich und bedeutet zeitaufwendige Rangierarbeit für die Mitarbeiter.

Zwischen den Spuren 3 und 4 (sowie 9 und 10 bzw. 13 und 14) befindet sich aus Statikgründen eine Säulenkonstruktion aus Beton. Ein Überqueren selbiger ist mit einem Fahrzeug nicht möglich.

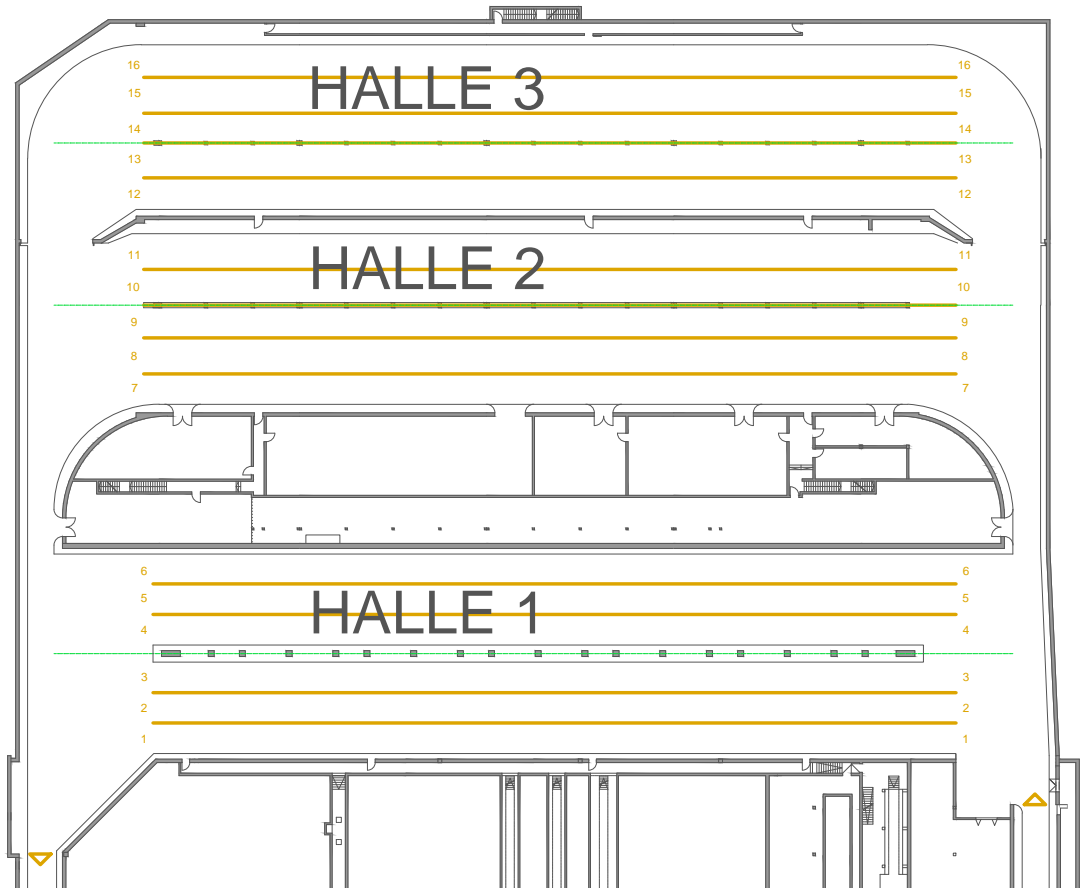


Abbildung 4.1: Grundriss der IVB Tiefgarage. Der selbst gewählte Nullpunkt befindet sich in der oberen linken Ecke des Plans.

Orientierung und Koordinatensystem

Die aus internen IVB-Prozessen resultierende Orientierung des Grundrisses der Tiefgarage wird beibehalten: Norden befindet sich auf der Planunterseite. Der Nullpunkt für das eigene Koordinatensystem wurde in Hinblick auf die WLAN Site Survey oben links gesetzt, mit einem Versatz von 10 Metern zur süd- und ostseitigen Innenmauer. In der später dargestellten Abbildung 4.2 ist der Raster im Plan ersichtlich.

Nachdem für die Positionsausgabe die Umrechnung softwareseitig auf GPS-Koordinaten erfolgt, ist das intern verwendete Koordinatensystem für den Benutzer nie wirklich ersichtlich.

4.2.3 Fahrzeuge

Bei den Fahrzeugen wird je nach Modell das WLAN-Device von IBIS oder DigiTacho verwendet. Die Antennen befinden sich in der Regel zentriert am Fahrzeugdach. Um den Längen-Offset bei der Positionierung zu berücksichtigen, wird pro Fahrzeugtyp in der Fahrzeugart-Tabelle der Abstand von der Fahrzeugspitze (Frontscheibe) bis zur Antenne angegeben, siehe Tabelle 4.1 für Beispieldatensätze.

id	name	length	height	wlanoffset
1	Einsatz	5,0	2,0	0,7
2	Gelenk	18,0	3,08	2,3
3	Solo	12,0	3,36	2,2

Tabelle 4.1: Fahrzeugarten mit Abmessungen.

Nachdem der Antenneneinbau nicht immer an exakt der gleichen Stelle erfolgt, kann optional in der Fahrzeug-Tabelle ein individueller Korrekturwert eingepflegt werden.

Aus Energiespargründen bleibt die Bordspannung der Fahrzeuge nicht permanent aktiv. Sobald sich der Bus bzw. die Straßenbahn in Ruheposition befindet (d.h. der Fahrer hat das Fahrzeug abgestellt und verlassen, die Zündung ist aus), bleibt das Bordnetz noch für etwa 20 Minuten aktiv. In dieser Zeit erfolgen Aktualisierungen sowie die Datenversorgung bzw. -beschaffung diverser Systeme. Nach diesen 20 Minuten wird auch die Internetverbindung über Wireless LAN abgebrochen.

Zumal die derzeit verbauten WLAN-Devices nicht *wake on LAN* fähig sind, besteht keine weitere Möglichkeit, das Fahrzeug von außen anzusprechen. Dieser Umstand und die Tatsache, dass die Anmeldung des Clients im Netzwerk Zeit beansprucht, wird anhand von drei Sonderfällen behandelt.

Neustart des Ortungssystems

Liegen bei einem Reboot des Ortungssystems keine Positionen aus der Vergangenheit vor, kann eine Ortung über WLAN erst durch die Spannungsversorgung der einzelnen Fahrzeuge wieder stattfinden. Die Lösung besteht darin, in solchen Sonderfällen den Anwender eine Korrektur mittels Interface beim Betriebshofmanagement durchführen zu lassen.

Erstens kann ein Totalausfall des Systems als sehr unwahrscheinlich angenommen werden.

Zweitens findet aus prozesstechnischen Gründen ein stetiger Stellplatzwechsel statt, d.h. Fahrzeuge befinden sich in der Regel meist kaum länger als einen halben Tag an ein und demselben Standort.

Und drittens werden weiterhin die Ein- und Ausfahrten in/von die Tiefgarage separat

registriert. Das alternative Ortungssystem per Infrarot-Baken unterscheidet in diesem Fall zwischen den Positionen Tiefgarage und Betriebshof. Diese Informationen werden an das BHM weitergeleitet und dort entsprechend abgehandelt.

Schnelle Ausfahrt aus der Tiefgarage

Die fahrplanmäßige Ausfahrt der Busse in den Morgenstunden (5 bis 8 Uhr) erfolgt relativ rasch. Während alle Bordsysteme schrittweise hochgefahren werden und auch eine WLAN-Verbindung erst im Aufbau ist, erfolgt möglicherweise bereits die Ausfahrt aus der Tiefgarage.

Dieser Problemfall ist dahingehend unberechtigt, da auch hier die Position spätestens bei der Ausfahrt von der Tiefgarage in den Betriebshof vom IR-Bakensystem erfasst wird. Die Ortungsinformation per WLAN scheint in diesem Fall nicht zwingend notwendig zu sein.

Schnelle Fahrzeugbewegungen innerhalb der Tiefgarage

Erfolgen beispielsweise schnelle Rangierarbeiten der Werkstatt in der Tiefgarage (z.B. ein Bus von Halle 1 nach Halle 3), so bleibt nach dem Fahrzeugstillstand die Bordspannung wieder für 20 Minuten aktiv. Das Fahrzeug kann sich regulär an einem Access Point anmelden und eine Ortung erfolgen.

4.3 WLAN Site Survey

Bei den verwendeten Access Points handelt es sich um unterschiedliche Geräte der ZoneFlex Serie des Herstellers Ruckus Wireless. Diese professionellen WLAN Sendegeräte bieten neben einer zentralen Konfigurationsmöglichkeit mit dem ZoneDirector noch weitere Vorteile gegenüber Standard-Hardware.

So verfügen alle Geräte über das patentierte *Ruckus BeamFlex System*. Dabei handelt es sich um eine dynamische Antennenausrichtung. Durch ein softwaregesteuertes, hochverstärkendes Antennen-Array wird jedes 802.11-Paket fortlaufend über den jeweils leistungsfähigsten Signalpfad geleitet.

Durch die dynamische Kanalverwaltung *Ruckus ChannelFly* wählt das ZoneFlex Gerät automatisch die Kanäle für den höchsten Durchsatz aus, wobei eine Anpassung an veränderte Umgebungsbedingungen geschieht. Durch diese Methode werden höhere Übertragungsgeschwindigkeiten und Signalstärken erreicht. [Ruckus15]

Während der Messung in der Tiefgarage werden der Site Survey Software der Grundriss von Halle 1 hinterlegt (z.B. AutoCAD Datei). Je nach gewünschter Genauigkeit können über den Grundriss noch Hilfslinien und Raster eingezeichnet (5m, 2m oder 1m) werden. Dies dient während des Messvorgangs dazu, dem Programm leichter und genauer den aktuellen Standort mitzuteilen. Abbildung 4.2 zeigt den Grundriss der Tiefgarage mit dem unterirdisch verwendeten Koordinatensystem und einem 5m Raster.

Der Site Survey Software können sowohl Nullpunkt als auch der Maßstab des Plans mitgeteilt werden. Dadurch werden die Koordinaten der Messung im Anschluss direkt weiterverwendbar.

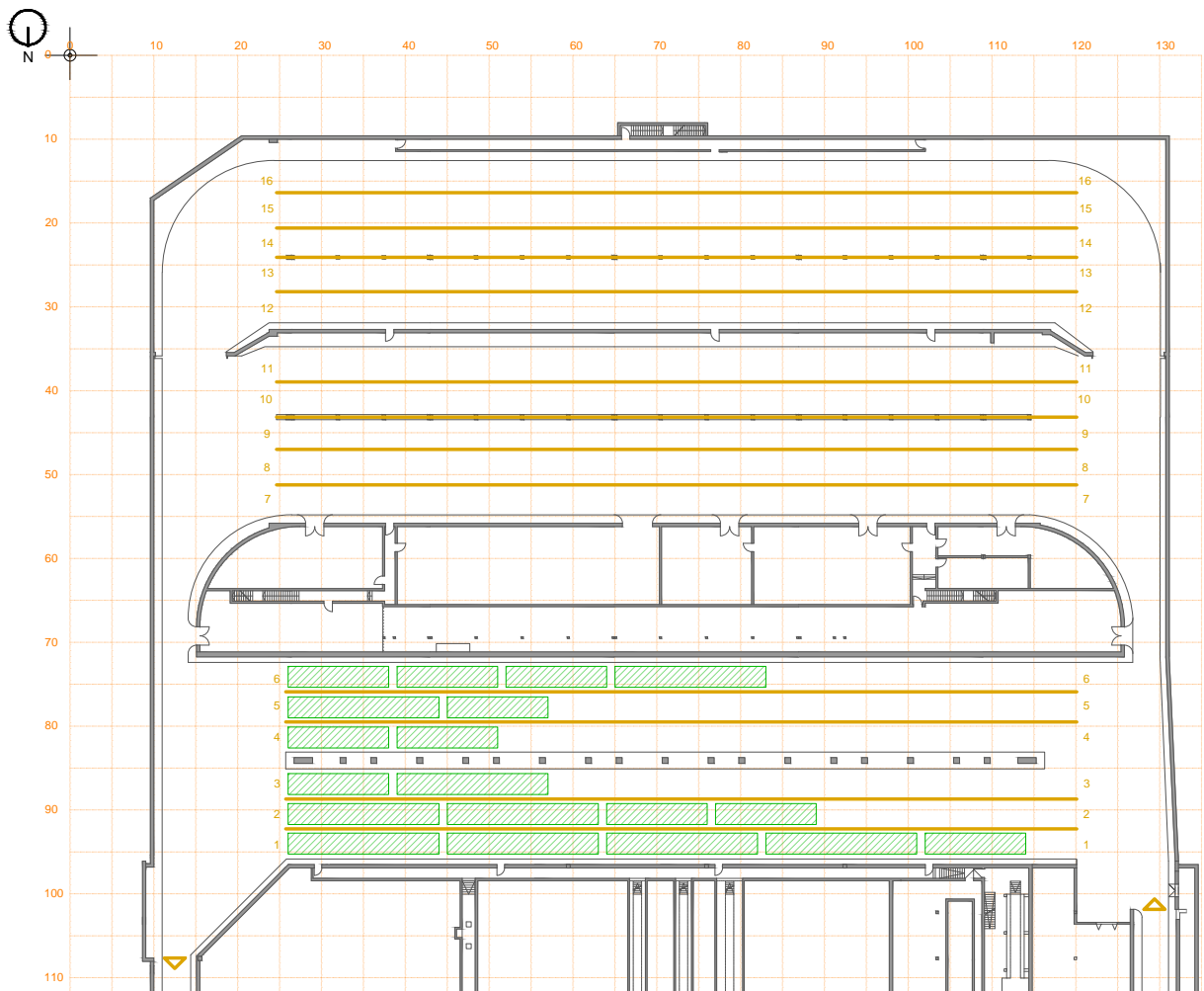


Abbildung 4.2: Grundriss der IVB Tiefgarage mit 5m Raster.

Während der Site Survey werden die Messwerte laufend mitprotokolliert und in einem Textfile abgespeichert. Dieses wird zur Weiterverarbeitung konvertiert und in die MySQL Datenbank importiert. Pro Messpunkt werden über 20 verschiedene Datenwerte erfasst bzw. ausgewertet.

Nachfolgende Liste zeigt einen Auszug davon, sowie die Daten eines Beispieldatensatzes:

- id ('8007')
- datetime ('1427272108')
- pos-X ('14.642838')
- pos-Y ('77.502152')
- channel ('1')
- ssid ('IVBIBIS')
- mac-ap ('6892345A7C48')
- signal-dbm ('-21')
- noise-dbm ('-95')
- media-type ('802.11gn')
- node-name ('Ruckus-5A:7C:48')
- packet-count ('0')
- packet-lost ('0')
- retry-rate ('0')

In Abbildung 4.3 ist der gewählte Messweg (Survey Path) in Halle 1 dargestellt. Dabei wurden in Summe 113 verschiedene Messpunkte manuell bestätigt. In X-Achse wurde ein 5m Raster verwendet, welches praktisch mit einem Messrad-Streckenmesser kontrolliert wurde. In Y-Richtung erfolgte die Orientierung anhand der Bodenmarkierungen (Fahrspuren).

Während dieser Site Survey wurden von der Software insgesamt 88.785 Datensätze aufgenommen. Davon stammen 17.570 von den relevanten Access Points in Halle 1. Der Rest fällt auf anderwertig empfangene Signalquellen (Access Points in den Halle 2 und 3, oder in der darüberliegenden O-Bus Halle, etc.).

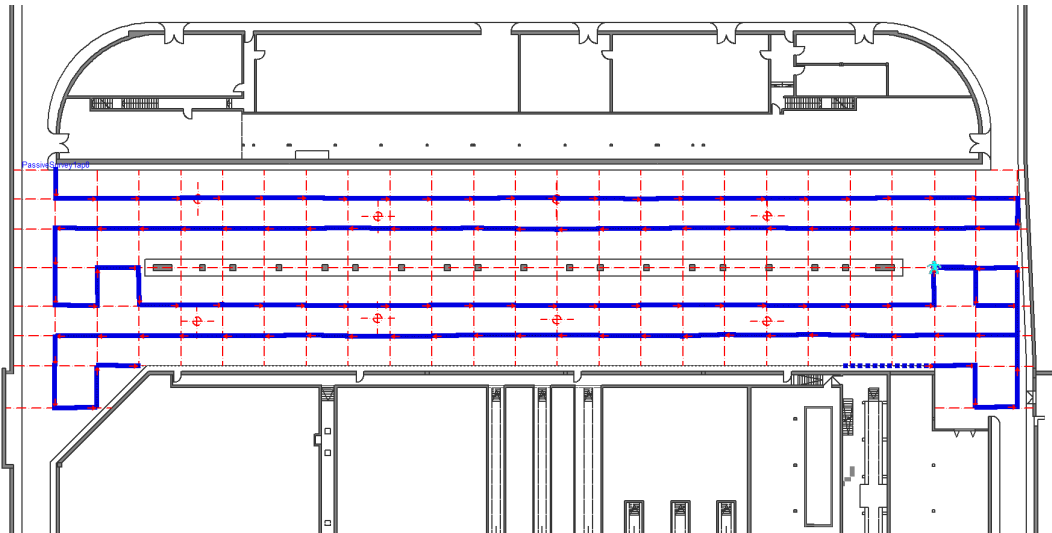


Abbildung 4.3: Halle 1 mit Raster und Survey Path.

Die Software bietet die Möglichkeit einer aktiven und einer passiven Messung. Bei der hier angewandten passiven Variante werden permanent sämtliche empfangbaren Netzwerke protokolliert. Der Vorteil besteht darin, dass man Informationen über Überlagerungen erhält und Interferenzen leicht entdecken kann. Auch für das Channel-Management der Access Points wird ein passiver Scan benötigt.

Bei einer aktiven Survey hingegen kann vorab auf gewisse Kanäle, SSIDs oder Access Points gefiltert werden. Die Messung erfolgt dabei etwas präziser und die Datenmenge wird überschaubarer.

4.3.1 Erste Messversuche

Im Vorfeld werden bereits zu Testzwecken mehrere Site Surveys durchgeführt. Die Vermessung erfolgt nicht wie in Abbildung 4.3, sondern in Form einer einfachen Schleife durch die Halle 1. Dabei wird mit einem Streckenmessgerät der Weg mitgemessen und alle 5m die Position der Software manuell bestätigt und ein Messwert aufgenommen.

Es zeigt sich, dass durch abgestellte Fahrzeuge zum Teil erhebliche Reflexionen und damit einhergehende Signalstärkenverluste vorhanden sind. Auch wurde das Messergebnis durch vorbeifahrende Busse gestört.

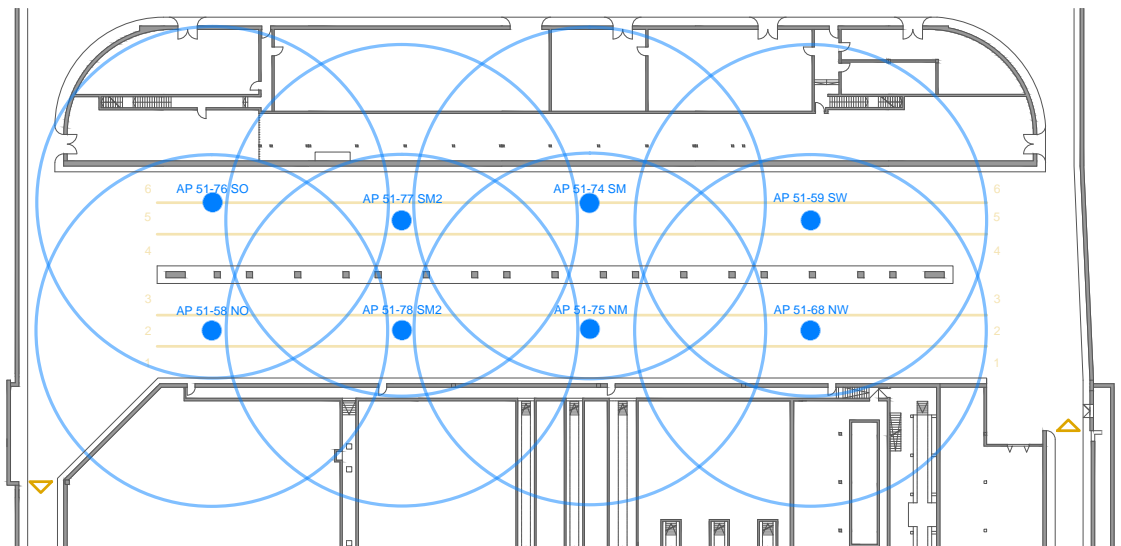


Abbildung 4.4: Halle 1 mit Positionen der acht Access Points.

Abbildung 4.4 zeigt den Grundriss von Halle 1 mit den Positionen der acht installierten Access Points. In der Abbildung wurde pro Sendequelle noch ein Kreis mit 20m Radius eingezeichnet.

Bezüglich der Access Points konnte empirisch festgestellt werden, dass deren alte Montage-Position nicht optimal gewählt wurde. Laut Herstellerangaben sollen die Geräte kopfüber an der Decke positioniert werden. Zum Messzeitpunkt waren die beiden bereits installierten Access Points jedoch in den Seitenstreben an der Decke horizontal positioniert und konnten so ihre maximale Sendeleistung nicht voll erbringen.

In den grafischen Auswertungen war sogleich ersichtlich, dass das Signalstärkenmaximum vor allem von AP 51-58 nicht direkt an der Position des Access Points gemessen werden

konnte, sondern knapp 10m davon entfernt. - Dieses Verhalten ließ sich zwar nicht komplett unterbinden, jedoch wurde durch die horizontale Montage auf die Deckenfläche eine erhebliche Verbesserung erreicht.

Abbildung 4.5 zeigt die Neumontage von Access Point AP-51-58 an der Decke.

Für die nun beschriebenen Tests erfolgen mehrere Messungen. Aus der Literaturrecherche war anfänglich nicht klar, wieviele Access Points unter den herrschenden Bedingungen benötigt werden. Deshalb werden einzelne WLAN Site Surveys mit unterschiedlicher Anzahl aktiver Access Points durchgeführt und deren Ergebnisse analysiert.

Alle nachfolgend beschriebenen Messungen werden am gleichen Tag unter gleichen Voraussetzungen durchgeführt. In der Tiefgarage befindet sich zum Zeitpunkt der Site Survey kein einziges Fahrzeug. Auch Störungen durch vorbei- bzw. durchfahrende Busse gibt es keine.



Abbildung 4.5: Neumontage von Access Point AP-51-58 kopfüber an der Decke.

4.3.2 Messung mit zwei Access Points

Der erste Screenshot in Abbildung 4.6 zeigt die Messergebnisse mit nur zwei aktiven Access Points. Dies stellt die Ausgangslage in der Tiefgarage dar. Mittels dieser Realisierung ist eine flächendeckende WLAN-Versorgung gerade noch möglich.

Zur besseren Betrachtung werden bei der grafischen Darstellung nur Signale bis zu einer Dämpfung von -50dB dargestellt.

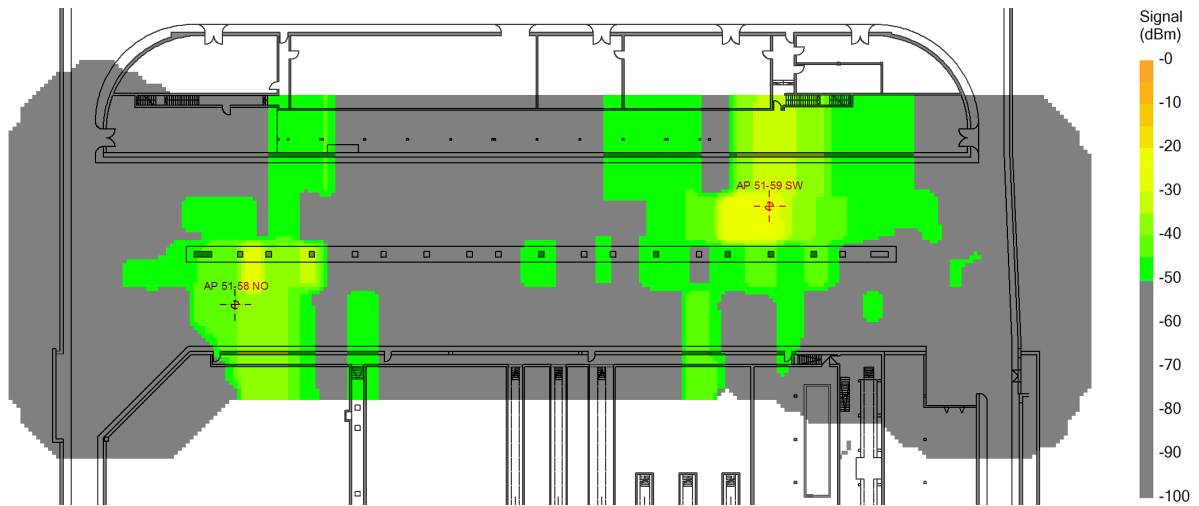


Abbildung 4.6: Site Survey von Halle 1 mit zwei aktiven Access Points.

Fazit

Es zeigt sich, dass für die Ortung der Sendebereich bis zu -50dB der beiden Access Points bei Weitem nicht die gesamte Stellfläche abdeckt. Auch im Diagramm deutlich ersichtlich: das Maximum von AP 51-59 (links unten im Bild) liegt nicht exakt an dessen Montageposition. Dieses Verhalten wurde bei allen Messungen festgestellt und konnte nicht vollständig behoben werden. Ein Tausch dieses Gerätes könnte die Situation verbessern. Die Notwendigkeit dafür ist jedoch nicht gegeben, da für die Ortung über Fingerprinting die exakte Position der Sendequelle zumindest vorerst unerheblich scheint.

4.3.3 Messung mit sechs Access Points

Die Ergebnisse der Messung mit zwei Access Points sind unbefriedigend. Deshalb werden 4 weitere Stück installiert und in das SNMP-Netzwerk integriert. Die Platzierung der Geräte kann leider nicht ideal erfolgen, es musste Rücksicht auf die baulichen Gegebenheiten genommen werden. Im nordseitigen Teilbereich konnten die drei (in Folge vier) Access Points in einer Linie parallel zu den Fahrspuren montiert werden; südseitig war dies leider nicht möglich. Auch konnten die beiden Access Points 51-74 und 51-75 nicht weiter in der Mitte befestigt werden. Dennoch wurde unter diesen Voraussetzungen eine Site Survey durchgeführt.

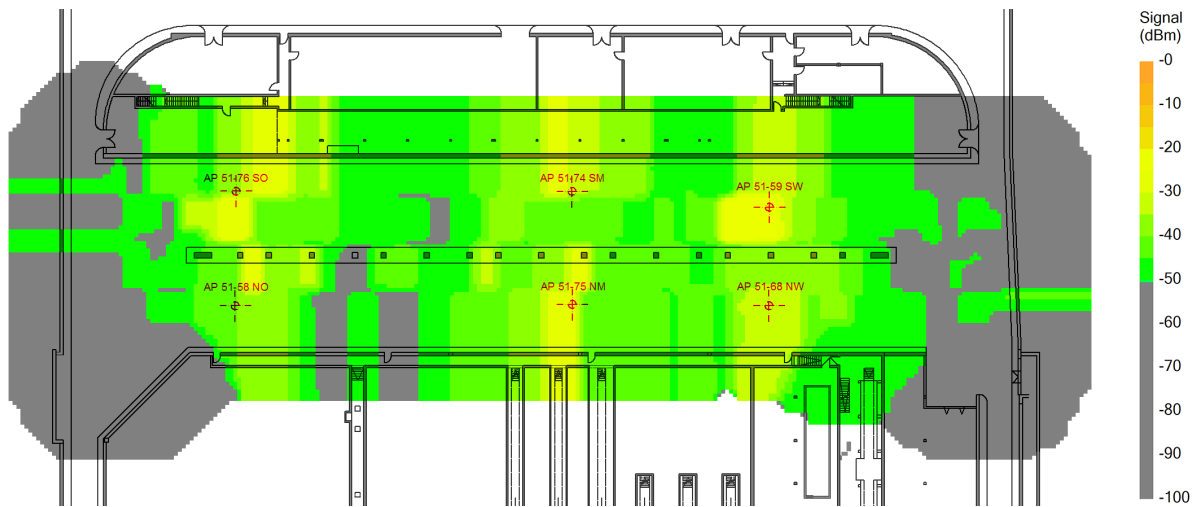


Abbildung 4.7: Site Survey von Halle 1 mit sechs aktiven Access Points.

Fazit

Mit sechs aktiven Access Points ist eine deutliche Steigerung ersichtlich, siehe Abbildung 4.7. Fast flächendeckend ist in Halle 1 WLAN verfügbar. Trotzdem wird aus der Site Survey ersichtlich, dass zwischen den östlichen und den mittleren Access Points mit über 45m Distanz eine sehr große Fläche abgedeckt werden muss. Vor allem der Bereich im Nord-Osten bei AP 51-58 scheint unzureichend versorgt. In diesem Bereich der Garage werden tagsüber oft Fahrzeuge abgestellt, wodurch eine genaue Ortung speziell an dieser Stelle notwendig ist.

4.3.4 Messung mit acht Access Points

Die Positionen der bestehenden sechs Sender werden nur minimal verändert und das Netzwerk um zwei weitere Geräte ergänzt. Diese beiden Access Points zwischen den östlichen Geräten (AP 51-76 und 51-58) und den beiden mittleren (AP 51-74 und 51-75) installiert. Alle Geräte sind kopfüber an der Decke montiert. Abbildung 4.4 unter Punkt 4.3.1 zeigt deren exakte Position am Grundriss.

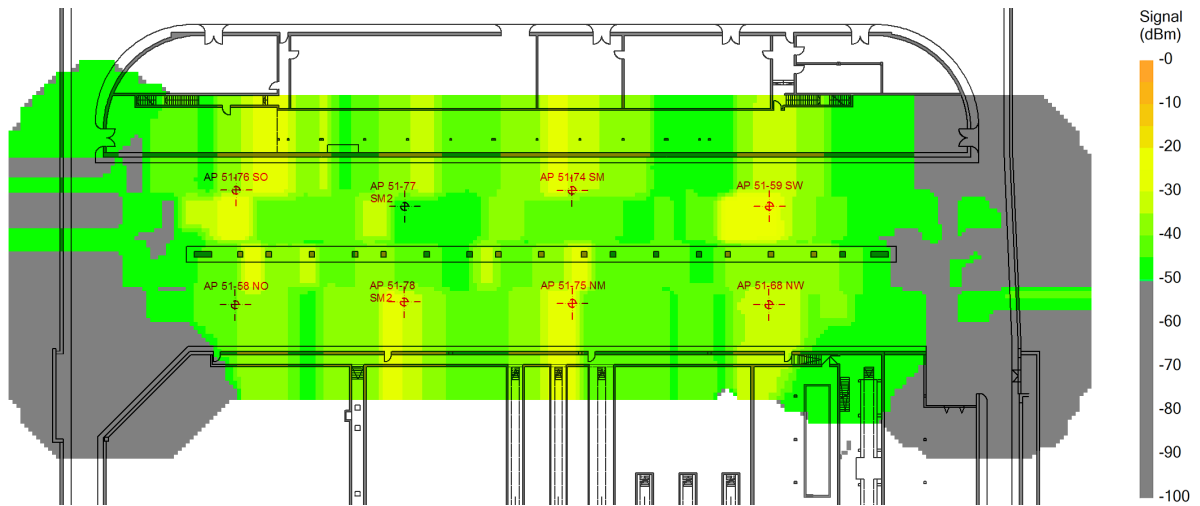


Abbildung 4.8: Site Survey von Halle 1 mit acht aktiven Access Points.

Fazit

Abbildung 4.8 zeigt nun eine deutliche Verbesserung. Bei einer Darstellung von einer maximalen Dämpfung von -50dB erfolgt eine vollständige WLAN-Versorgung an den Stellflächen. Nachdem weitere Surveys gezeigt haben, dass der Ein- und Ausfahrtsbereich von anderen am Betriebshof befindlichen Access Points (z.B. Halle 2 und 3 oder die Waschstrasse) gestört werden, wird die Versorgung an dieser Stelle vernachlässigt.

4.3.5 Zusammenfassung der Messergebnisse

Die eigentlich nur zu Testzwecken installierten Access Points AP 51-77 und AP 51-78 scheinen unabdingbar. Die Positionierung der acht Geräte ist dabei nicht ideal erfolgt, siehe Abbildung 4.4. Der Abstand zwischen den Geräten könnte leicht vergrößert werden, sodass die westlichen und östlichen Access Points weiter in nach außen wandern. Gerade der Einfahrtsbereich scheint relativ schwach abgedeckt zu sein. Die absolute Notwendigkeit zur Neupositionierung ist allerdings nicht gegeben, da die Messung sowieso auf die Fahrzeugspitze passiert und dort der Empfang von AP 51-59 bzw. 51-68 laut Messdaten ausreichend ist. Bei Bedarf können sonst in Zukunft im Einfahrtsbereich noch zwei weitere Geräte problemlos montiert und ins Netzwerk aufgenommen werden.

Bei der grafischen Darstellung wurde bewusst das Maximum auf -50dB beschränkt. Es zeigt sich durch Vergleichsmessungen, dass das für die Site Survey verwendete Messgerät (die externe USB Antenne) bessere Ergebnisse liefert, als die in den Fahrzeugen verbauten WLAN-Geräte. Der Unterschied fällt dabei aber weit weniger groß aus wie befürchtet, was sich durch die Position der Antennen am Fahrzeugdach (näher an den Access Points) erklären lässt.

Weiters stellt die große Datenmenge der Site Survey eine Herausforderung an die Software dar. Um eine schnelle und gleichzeitige Ortung der Fahrzeuge zu garantieren, scheint eine Parallelisierung von Nöten. Alternativ macht eine Vorfilterung der Daten Sinn. Für die Ortung nicht relevante Empfangsdaten (z.B. von Access Points der benachbarten Hallen) können aus den Referenzdaten entfernt werden.

4.4 SNMP Kommunikation

Die Kommunikation mit den einzelnen Agenten erfolgt über den SNMP Manager. Es handelt sich dabei um den ZoneDirector 3025 von Ruckus Wireless. Dieser kann über das Simple Network Management Protocol angesprochen werden. Mit Hilfe der gerätespezifischen OIDs bzw. MIBs erfolgt die Abfrage der Signalstärkenwerte. Die Realisierung dieser Abfragen erfolgt mittels einer einfachen Skriptsprache: Perl. Perl erlaubt die einfache Abhandlung der SNMP-Befehle und ermöglicht einen schnellen Zugriff auf die MySQL-Datenbank um gefetchte Informationen rasch zu speichern.

Während der Initialisierungsphase werden die OID Templates definiert und vom Programm alle in der Tiefgarage bekannten Access Points eingelesen (vielmehr deren MAC-Adressen). Dazu erfolgt ein Zugriff auf die `accesspoints`-Tabelle in der Datenbank, Aufbau siehe Tabelle 4.2. Diese Tabelle beinhaltet alle für die Ortung relevanten Access Points, also z.B. auch solche in der Waschstrasse für die Referenzmessungen.

id	location	model	mac	ip	pos-x	pos-y
1	TG-Halle1-Nord-Mitte	zf7300	F0B0520543A0	172.30.51.75	75,0	90,0
2	TG-Halle1-Nord-Ost	zf7343	6892341A79E0	172.30.51.58	32,5	90,0
3	TG-Halle1-Sued-West	zf7343	6892341A7C40	172.30.51.59	101,0	78,5
4	TG-Halle1-Sued-Mitte	zf7300	F0B052051380	172.30.51.74	75,0	76,0
5	TG-Halle1-Sued-Ost	zf7300	F0B052054990	172.30.51.76	32,5	76,0

Tabelle 4.2: Auswahl installierter Access Points in Halle 1.

Nach der Initialisierungsphase beginnt die eigentliche SNMP-Session und damit die Endlosschleife. Abhängig von der Anzahl der erkannten MAC-Adressen im Netzwerk erfolgen die Ruhepausen zwischen den einzelnen SNMP Walks. Während eines SNMP Walks werden alle im Netzwerk befindlichen Clients gescannt. Als erstes wird die MAC-Adresse vom Access Point bestimmt, mit welchem der Client verbunden ist. Handelt es sich dabei um einen Access Point in der Tiefgarage, werden Name, BSSID und die RSSI vom Client ermittelt. Diese Daten werden in der Incoming Queue gespeichert. Tabelle 4.3 zeigt einige Datensätze, welche vom Fetcher-Modul in der Queue gespeichert wurden.

Nach der Speicherung wird der nächste Client überprüft. Sobald alle derzeit im Netzwerk befindlichen Clients behandelt wurden, erfolgt eine Entlastungspause. Zu Stoßzeiten (Früh und Abends, wenn die Garage relativ schnell gefüllt bzw. geleert wird) findet zwischen den einzelnen SNMP Walks nur eine kurze bis gar keine Pause statt.

id	datetime	ap-bssid	ap-mac	client-mac	client-rssi
265121	2015-04-16 18:01:56	IVBDigiTacho	6892341A7C40	000B6B2420ED	-77
265122	2015-04-16 18:01:56	IVBDigiTacho	F0B0520543A0	000B6B77DC03	-61
265123	2015-04-16 18:01:56	IVBIBIS	6892341A79E0	001723A8B215	-47
265124	2015-04-16 18:02:01	IVBDigiTacho	6892341A7C40	000B6B2420ED	-77
265125	2015-04-16 18:02:01	IVBDigiTacho	F0B0520543A0	000B6B77DC03	-61
265126	2015-04-16 18:02:01	IVBIBIS	6892341A79E0	001723A8B215	-47
265127	2015-04-16 18:02:07	IVBDigiTacho	6892341A7C40	000B6B2420ED	-77
265128	2015-04-16 18:02:07	IVBDigiTacho	F0B0520543A0	000B6B77DC03	-61

Tabelle 4.3: Beispieldatensätze Fetcher Tabelle.

4.5 Positionsbestimmung

Die Positionsbestimmung erfolgt wie bereits im Kapitel 3 beschrieben. Eine Analyse der SNMP Daten zeigt, dass die Verbindung der Clients (Fahrzeuge) mit den Access Points nicht immer gleich erfolgt. Leichte Umgebungsänderungen (z.B. ein vorbeifahrender Bus) veranlassen einen Client dazu, sich von einem auf den anderen Access Point umzumelden - ohne, dass eine Bewegung des Fahrzeuges stattgefunden hat. Wie bereits in vorhergehenden Abschnitten erwähnt, kann diese Ummeldung jedoch nur in den ersten 20 Minuten nach Abstellung des Fahrzeuges passieren, da später keine Bordspannung mehr vorhanden ist und die WLAN-Verbindung des Fahrzeuges beendet wird.

4.5.1 SNMP Fetcher

Die gesammelten Daten vom Fetcher liegen grundsätzlich in ausreichender Genauigkeit vor. Es zeigt sich allerdings, dass während der Stoßzeit in der Früh eine extrem schnelle Ausfahrt der Busse erfolgt. Gleiches gilt für das Abstellen der Fahrzeuge nach der Reinigung am Abend. Letztere Situation stellt die größere Herausforderung dar - möchte man doch genau in diesen Momenten einen guten und genauen Überblick über die Stellplatzsituation in der Tiefgarage besitzen. Eine Lösung findet sich darin, dass man das Fetcher-Modul noch dynamischer gestaltet, d.h. die Spitzenzeiten im Netzwerk dürfen auf keinen Fall "verschlafen" werden. Dies geschieht durch Analyse der Netzwerkbelastung über einen längeren Zeitraum.

4.5.2 DataCruncher

Der DataCruncher wird in einem ersten Schritt sehr primitiv ausgeführt. Nachdem die Optimierungsmöglichkeiten vorerst zu umfangreich scheinen, erfolgt die erste Ortung möglichst einfach.

Am Beginn werden vom betreffenden Fahrzeug die letzten SNMP Messages gesammelt. Diese werden auf ihre Unterschiedlichkeit bei der Signalstärke hin untersucht. Wie bereits beschrieben, kann ein Wechsel zu einem anderen Access Point (mit anderem empfangbarem RSSI) nicht nur durch eine Positionsänderung, sondern auch rein durch Außen-

einflüsse passieren. Bei der Analyse muss also ständig der der Signastärke zugeordnete Access Point betrachtet werden. Bleibt die MAC-Adresse des Senders über einen längeren Zeitraum unverändert, können diese Werte einfach verwendet werden. Ein gewichteter Mittelwert hat sich in der Praxis als brauchbare Variante erwiesen. Erreicht man dabei keine zufriedenstellenden Ergebnisse, können weitere, ältere SNMP Messages von einem anderen Access Point herangezogen werden. Hierbei ist allerdings der zeitlich Faktor nicht zu vernachlässigen. Es besteht ja die Möglichkeit, dass sich das Fahrzeug in der "Access Point - Wechselzeit" vielleicht auch nur ein paar Meter bewegt hat.

Der dann im Anschluss für die Site Survey verwendete RSSI ist also von großer Bedeutung. Es gilt die Schwankungen innerhalb des Zeitraumes - wo sich das Fahrzeug nicht bewegt - zu erkennen und statistisch zu behandeln. Fahrzeuge die während dieses Zeitraumes mit ihrer Vorbeifahrt das Messergebniss (kurzzeitig) beeinflussen, müssen auch berücksichtigt werden.

4.5.3 Cell of Origin

Diese Methode erweist sich in der Praxis als bedingt nützlich. Nur auf Grund der Anmeldung des Clients an einem gewissen Access Point lässt sich keine erste Grobortung durchführen. Maximal kann eine Aufteilung in Himmelsrichtung-Viertel vorgenommen werden. Das Problem ist darauf zurückzuführen, dass die An- und Abmeldung an einem Sendegerät vom WLAN-Device des Fahrzeuges selbständig funktioniert und man auf dessen Logik kaum Einfluss nehmen kann.

Cell of Origin ist nur dann von Nutzen, wenn wenige Fahrzeuge in der Tiefgarage sind und der gemessene Signalpegel relativ hoch und über eine längere Zeit konstant ist. Dann kann aber gleich eine Ortung mittels Fingerprinting gemacht werden.

4.5.4 Fingerprinting

Wie bereits erwähnt, müssen die Referenzdaten in bestmöglicher Genauigkeit vorliegen. Nur so können Ortungsgenauigkeiten von wenigen Metern erreicht werden. Die Datenanalyse der Site Survey hat gezeigt, dass die gemessenen Signalstärken nicht kontinuierlich sondern unstetig vorliegen.

Für die Lokalisierungsphase müssen natürlich auch die von der Initialisierungsphase stammenden Messwerte möglichst genau und schwankungsfrei vorhanden sein. Hier ist bereits bei der Implementierung vom DataCruncher große Vorsicht geboten und eine statistische Aufwertung der Messwerte nur mit Sorgfalt durchführbar.

4.6 Betriebshofmanagement

Das Betriebshofmanagement dient zur Darstellung der Fahrzeugpositionen für die unterschiedlichen Benutzergruppen. Bislang wird die Position nur durch die IR-Baken am Betriebshof gewissen Teilbereichen zugeordnet. Einen Screenshot der eingesetzten Weblösung zeigt Abbildung 4.9.

The screenshot shows the 'ivb.Betriebshofmanagement' interface. At the top, there is a navigation bar with 'News', 'Fahrzeugsuche', 'Plan ansehen', 'Statistiken', 'Wartung', 'Einstellungen', and 'Manuell'. Below this, there are several sections:

- Gesamtübersicht:** A table showing vehicle counts by type and status.

FzgArt	frei	Werkst	Normal	Einsch	Reserv
Bombardier	10	0	21	0	0
Gelenk	52	2	23	1	0
Solo	38	9	17	3	0
Überland	10	2	0	0	0
- letzte Bakenmeldung:** 2015-04-26 18:10:49
- Relevante Reservierungslimits:** A table showing limits for different vehicle types and statuses.

FzgArt	Status	lst	Soft	Hard
Gelenk	Einschub (WeSta)	1	12	14
Gelenk	Werkstatt	9	20	30
Solo	Werkstatt	16	20	30
- login history:** A list of login events with timestamps and 'Login' status.
- Betriebshof:** A table showing the distribution of vehicles across different locations.

Standort	gesamt	Einschub (WeSta)	frei	Normalbetrieb (FDL)	Reserve	Werkstatt
Bus Halle	8	0	7	0	0	1
Hinterhof, Werkstatt	14	0	11	0	0	2
lange Grube	0	0	0	0	0	0
Straß Halle	2	0	2	0	0	0
Tiefgarage	59	1	56	0	0	1
Vorhof, Werkstatt	14	0	11	0	0	3
Waschstrasse	11	0	9	0	0	0
- Unbestimmt und Liniennetz:** A table showing counts for 'Liniennetz' and 'unbestimmt' categories.

Standort	gesamt	Einschub (WeSta)	frei	Normalbetrieb (FDL)	Reserve	Werkstatt
Liniennetz	83	3	4	61	0	4
unbestimmt	25	0	10	0	0	2

Abbildung 4.9: ivbBHM Screenshot: Standortübersicht.

Der Screenshot zeigt die Ortungsbereiche welche durch die Infrarot (IR)-Baken bereits vorhanden sind. Bei Klick auf die einzelnen Bereiche erhält der User Details über die Fahrzeuge welche dort abgestellt sind.

4.6.1 Integration

Die Integration der Daten durch die WLAN-Ortung erfolgt über die MySQL Datenbank. Dort schreibt der DataCruncher die ermittelte Position hinein, welche dann im BHM dargestellt wird. Im BHM werden auch die Ortungsdaten des Bakensystems und der GPS-Ermittlung gesammelt. Um dabei eine Kompatibilität zu garantieren, werden alle Positionsdaten auf das gleiche Koordinatensystem umgerechnet. In diesem Fall wurde das

GPS-Format gewählt.

Zum jeweiligen Standort wird auch die Genauigkeit der ermittelten Daten angegeben. Dadurch weiß der Benutzer sofort, wie verlässlich die Positionsinformationen sind.

4.6.2 Ausgabe

Die Positionsangabe selbst erfolgt im Betriebshofmanagement tabellarisch oder graphisch. Ersteres wird mit einer umfangreichen Suchfunktion kombiniert. So können beispielsweise Disponenten gezielt nach einem Fahrzeug suchen, welches Ihren gewünschten Anforderungen entspricht (Ausstattung, Fahrzeugart, Position, Status, Firma, etc.). Dem User wird dann der aktuelle Standort mitgeteilt - mit der Option, sich selbigen darstellen zu lassen.

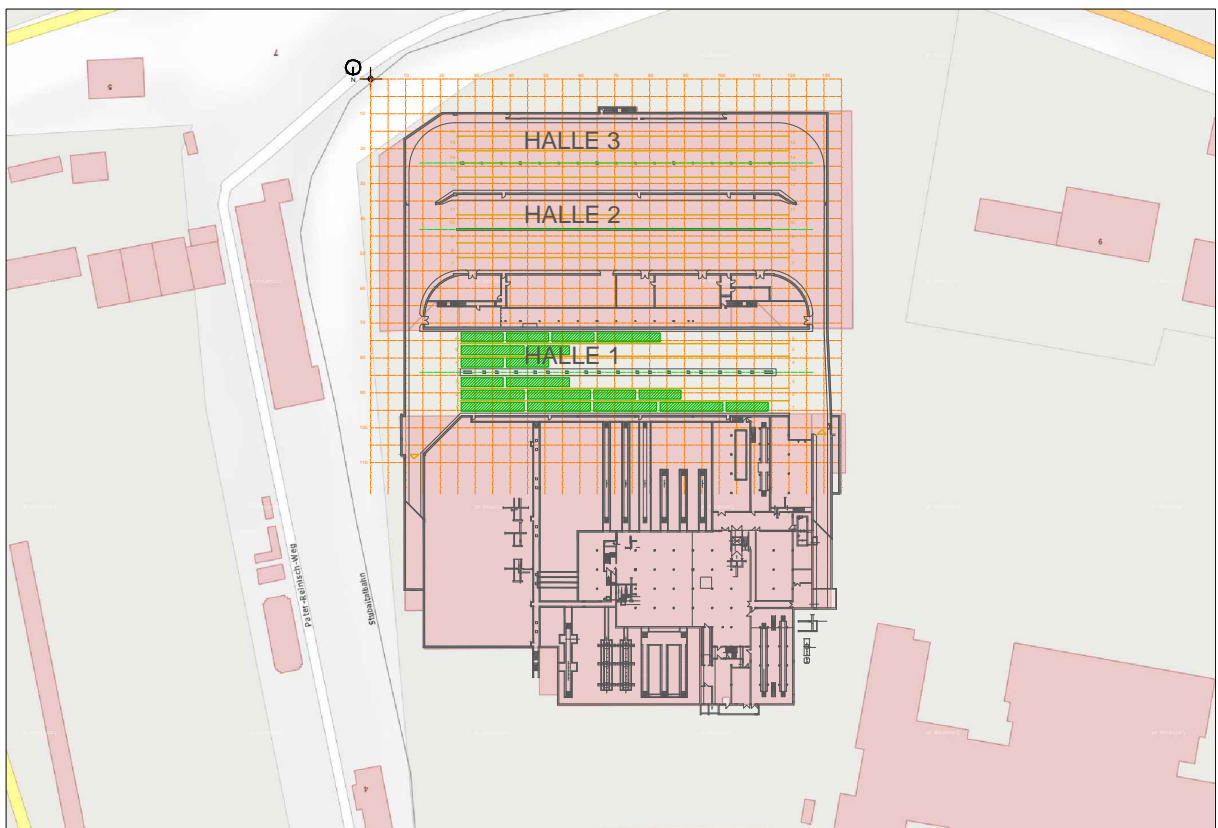


Abbildung 4.10: ivbBHM Screenshot: graphische Ausgabe des Betriebshofgelände.

Die graphische Ausgabe erfolgt ähnlich zu Web-basierten Navigations- und Kartendiensten. Der User kann einzelne Layer ein- bzw. ausschalten, wodurch er durch die einzelnen Bereiche des Betriebshofs navigieren kann. So erfolgt dann auch der Wechsel zwischen ober- und unterirdischer Darstellung. Abbildung 4.10 zeigt sowohl den Kartenlayer von openstreetmap, als auch den überlagerten Grundriss der Tiefgarage.

4.7 Zusammenfassung

Durch die mehrfach durchgeführten Site Surveys wurde ersichtlich, dass Halle 1 mit mindestens acht Access Points ausgestattet werden muss, um eine flächendeckende signalstarke WLAN-Versorgung zur Ortung von Fahrzeugen gewährleisten zu können.

Die Umsetzung der beiden Module SNMP-Fetcher und DataCruncher stellte insbesondere eine Herausforderung dar, als dass auf IT-technischen Gegebenheiten seitens der IVB stark Rücksicht genommen werden musste. Sobald die Integration der Access Points abgeschlossen war, funktionierte die Kommunikation zwischen Manager und Agenten problemlos. Hingegen stellte die vollständige Erfassung aller Fahrzeuge ein Problem dar. Immer wieder wurde ein Fahrzeug nicht im WLAN registriert.



Abbildung 4.11: Geparkter Gelenkbus in Halle 1 mit Access Point AP-51-68 an der Decke.

Auch die Montageposition der Antennen in der Halle selbst war von großer Bedeutung. [Abbildung 4.11](#) zeigt Halle 1 mit Access Point AP-51-68 welcher kopfüber an der Decke montiert wurde.

Die Ortungsgenauigkeit betreffend konnte gleich zu Beginn eine deutliche Verbesserung erreicht werden. Allein durch die Implementierung der SNMP-Kommunikation ist es bereits möglich, ein Fahrzeug der Tiefgarage zuzuordnen zu können. Durch die vereinfachte Umsetzung der Cell of Origin-Methode kann innerhalb einer Halle bereits eine Grobor- tung geschehen. Das bedeutet in Halle 1, dass ein Fahrzeug mit sehr hoher Zuverlässigkeit einem Viertel der Halle zugeordnet werden kann.

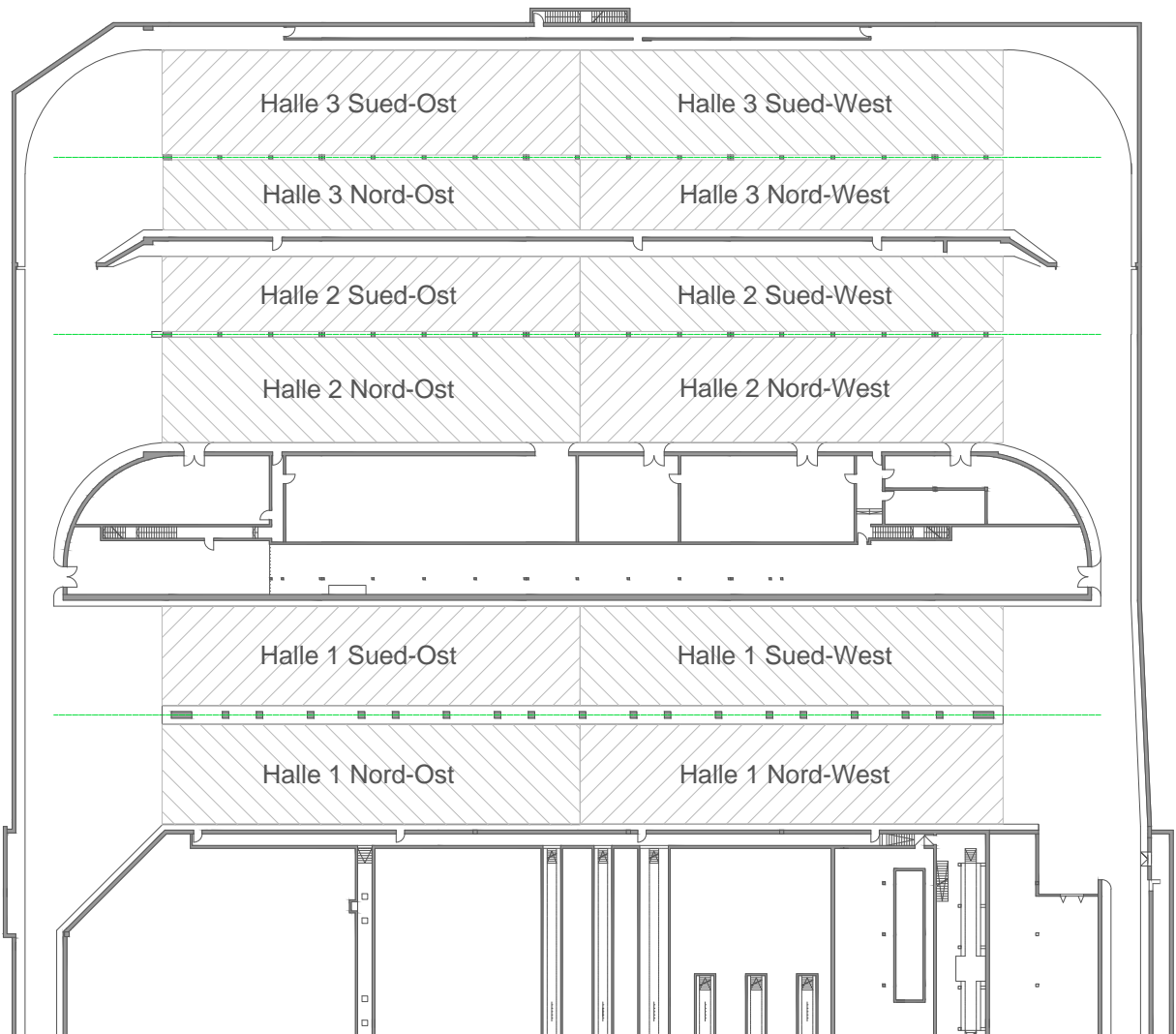


Abbildung 4.12: Grundriss Tiefgarage: Aufteilung in 12 Teilbereiche.

Abbildung 4.12 zeigt den Grundriss der gesamten Tiefgarage. Durch eine entsprechende WLAN-Versorgung auch in Halle 2 und 3 lassen sich Teilbereiche definieren. Damit ist bereits eine deutliche Verbesserung bei der Fahrzeugauffindung garantiert.

Der Fahrdienstleitung und der Werkstatt ist damit bereits sehr geholfen. Für die automatische Garagierung und weiterer Subsysteme des BHM bedarf es natürlich einer genaueren Ortung.

Für eine genauere Ortung durch Fingerprinting ist ein sorgfältiger Umgang mit den Daten notwendig. Bereits bei der Initialisierungsphase muss der Grundriss exakt in die Mess-Software eingelesen werden. Bei der Vermessung selbst sollten umgebende Einflussfaktoren weitestgehend eliminiert werden.

Erste Messergebnisse zeigen, dass bereits ohne großartige Optimierungsalgorithmen eine hohe Genauigkeiten erreicht werden können. Im nachfolgenden Kapitel 5 wird genauer darauf eingegangen.

Kapitel 5

Evaluierung und Tests

Dieses Kapitel beschreibt die durchgeführten Tests, um die Genauigkeit der Ortung an einem Fahrzeug zu überprüfen. Die Ergebnisse davon werden im Anschluss beschrieben und evaluiert.

Als letzter Punkt wird noch eine Auswahl an Ideen zur Verbesserung sowie Steigerung der Genauigkeit beschrieben.

5.1 Testumgebung

Für den Test wird mittels MySQL und PHP ein einfaches Webinterface erstellt. Damit können Logdateien eingesehen werden und der Status des BHM-Systems kontrolliert werden. Über das Interface können weiters sowohl Stammdaten als auch Messdaten geändert bzw. konfiguriert werden. Der Screenshot in Abbildung 5.1 zeigt eine durchgeführte Ortung.

Gestartet wird die Ortung mit der Eingabe einer Fahrzeugnummer. In der Fahrzeug-Tabelle werden die ID und die entsprechende MAC-Adresse ermittelt. Im Anschluss wird die letzte dem Fahrzeug zugeordnete SNMP-Meldung gelesen und das Zeitfenster für die SNMP-Messages definiert, welche für die Ortung verwendet werden. In diesem Fall sind zehn Minuten bestimmt.

Nun werden alle der MAC-Adresse zugeordneten SNMP-Meldungen gelesen und die letzten zehn Datensätze zu Debug-Zwecken dargestellt. Aus diesen Meldungen wird die durchschnittliche RSSI errechnet. Im Hintergrund wird kontrolliert, ob die Meldungen alle vom selben Access Point stammen und welche Verteilung die Signalstärken aufweisen. Daraus wird ein Durchschnitt bestimmt.

Als nächstes werden die Daten der Site Survey verwendet. Gefiltert wird dabei auf den entsprechenden Access Point mit Hilfe der MAC-Adresse und den gemessenen RSSI-Wert. In einem ersten Durchgang erfolgt die Suche mit exakt dem vorher bestimmten Signalstärke-wert. Liefert diese Suche bereits ausreichend Ergebnisse in der Site Survey Tabelle, so wird mit diesen Werten weitergearbeitet. Im anderen Fall kommt eine definierbare Toleranz zu tragen, d.h. man sucht in den Site Survey Daten nach Signalwerten äquivalent zu dem

IVB.BHM2
wir bewegen die stadt.

(try to) make localization

show logfile

show AP config

show fetched SNMP

show sitesurvey data

make localization

```

2015-04-25 18:11:43> start with new localization
2015-04-25 18:11:43> number Fahrzeug: 82
2015-04-25 18:11:43> ID Fahrzeug: 20
2015-04-25 18:11:43> MAC of Fahrzeug: 000B6B2428A3
2015-04-25 18:11:43> searching snmp data: 2015-04-24 06:28:34 < datetime < 2015-04-24 06:38:34
2015-04-25 18:11:43> number of fetched snmp datarows: 10

  DATETIME      AP-MAC      CLIENT-MAC  CLIENT-RSSI
2015-04-24 06:38:34 F0B0520543A0 000B6B2428A3 -58
2015-04-24 06:38:28 F0B0520543A0 000B6B2428A3 -58
2015-04-24 06:38:23 F0B0520543A0 000B6B2428A3 -58
2015-04-24 06:38:17 F0B0520543A0 000B6B2428A3 -58
2015-04-24 06:38:12 F0B0520543A0 000B6B2428A3 -58
2015-04-24 06:38:06 F0B0520543A0 000B6B2428A3 -58
2015-04-24 06:38:01 F0B0520543A0 000B6B2428A3 -58
2015-04-24 06:37:55 F0B0520543A0 000B6B2428A3 -58
2015-04-24 06:37:50 F0B0520543A0 000B6B2428A3 -58
2015-04-24 06:37:44 F0B0520543A0 000B6B2428A3 -58

2015-04-25 18:11:43> take avg RSSI: -58
2015-04-25 18:11:43> searching for AP in site survey data with MAC: F0:B0:52:05:43:A8
2015-04-25 18:11:43> searching survey data exact for: RSSI -58
2015-04-25 18:11:43> number of fetched survey datarows: 10

  XPOS      YPOS      SSID      SIGNAL-RSSI
119.820706 92.287059 IVBIBIS -58
119.970353 92.283529 IVBIBIS -58
120.120000 92.280000 IVBIBIS -58
120.237714 92.280000 IVBIBIS -58
120.355429 92.280000 IVBIBIS -58
120.473143 92.280000 IVBIBIS -58
120.590857 92.280000 IVBIBIS -58
120.708571 92.280000 IVBIBIS -58
120.826286 92.280000 IVBIBIS -58
120.944000 92.280000 IVBIBIS -58

2015-04-25 18:11:43> calculated X-POS of Fahrzeug: 120.4047059
2015-04-25 18:11:43> calculated Y-POS of Fahrzeug: 92.2810588
2015-04-25 18:11:43> work done.

```

Abbildung 5.1: Webinterface IVBBHM2: durchgeführte Ortung bei Fahrzeug Nr 82.

bestimmten RSSI-Wert. Dies erfolgt so lange, bis genug Werte der Survey vorhanden sind. Zehn dieser Werte sind wieder im Screenshot dargestellt.

Jetzt folgt die Analyse dieser Werte. Wie weit weichen innerhalb dieser Werte die X- bzw. Y-Koordinaten untereinander ab? Diese Schwankungen gilt es zu erkennen. Im dargestellten Fall war die Bestimmung erfolgreich, die Schwankung ist nicht zu groß und es kann für die Lokalisierung der Durchschnittswert für die X- und Y-Koordinaten verwendet werden. Sollten jedoch für einen Signalstärkewert mehrere Positionen möglich sein, so kommen weitere Algorithmen zum Tragen. Durch die baulichen Gegebenheiten kann die Stellfläche sehr eingeschränkt werden. Durch die Fahrspurinformation ist der Bereich der Y-Koordinaten ebenfalls beeinflusst.

Auch über die Fahrzeugeigenschaften können Ausschlüsse erfolgen: die Ortungskoordinaten betreffen immer den Beginn vom Fahrzeug. Es kann also durch die Untersuchung kein Stellplatz direkt am Ende der Fahrspur vorgeschlagen werden.

Sollte es dennoch mehrere Positionsmöglichkeiten geben, wird die Vergangenheit analysiert. Steht auf einer der in Frage kommenden Positionen bereits ein Fahrzeug?

Weiters kann die Vergangenheit vom zu ortenden Fahrzeug betrachtet werden: auf welchem Access Point war der Client vorher angemeldet? Über welche Spur erfolgte die Einfahrt in die Halle?

Durch die vielen Ausschlussmöglichkeiten gibt es in der Folge nur eine kausale Positionsbestimmung. Diese Behauptung wurde anhand einer Testreihe überprüft und bestätigt.

5.2 Testphase

5.2.1 Erste Testreihe

Die erste Testserie wurde im nördlichen Teil von Halle 1 absolviert. Mit dem Fahrzeug (Solobus Nummer 631) wurden mehrere Positionen in der Tiefgarage eingenommen und die Messwerte aufgezeichnet. Als WLAN-Device dient das im Fahrzeug verbaute IBIS-Gerät. Im Anschluss daran wurde die händisch notierte Position mit den Ergebnissen der Fingerprinting-Methode verglichen. Abbildung 5.2 zeigt die Testumgebung in der Tiefgarage. Während der Testreihe war in Halle 1 kein Verkehr.

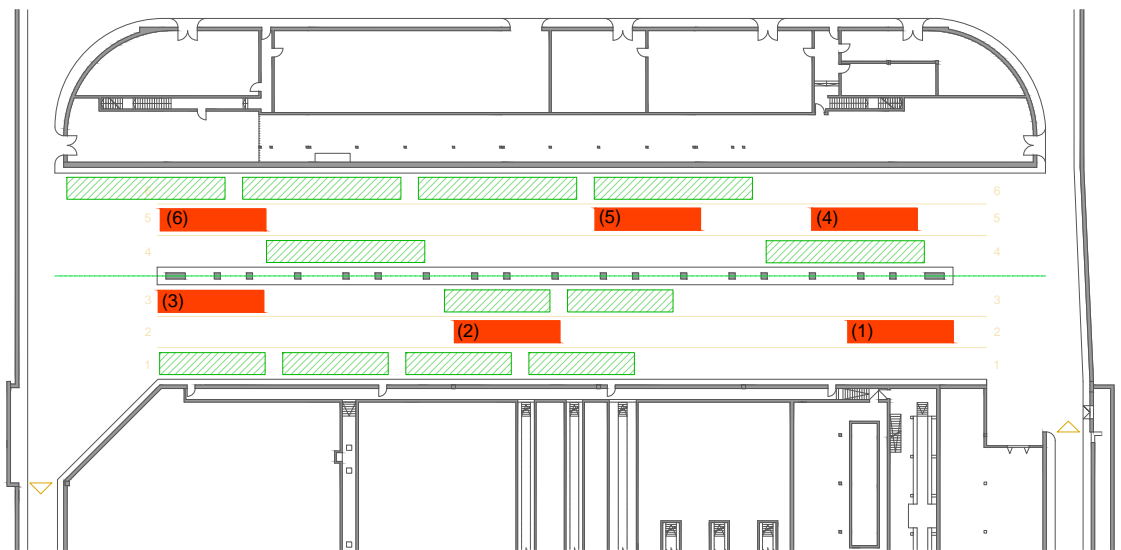


Abbildung 5.2: Testumgebung bei Evaluierung mit eingezeichneten Testpositionen.

Die Tabelle 5.1 zeigt das Protokoll der Messung sowie die Koordinaten der händisch notierten Standorte. Die Messung wurde bewusst innerhalb eines sehr kurzen Zeitraumes durchgeführt. Neben der Genauigkeit sollte damit auch die Schnelligkeit des Systems ermittelt werden. An den Messpunkten wurde das Fahrzeug für etwa zwei bis drei Minuten

positioniert.

Uhrzeit	Hallenbereich	Spur	X-Pos	Y-Pos
11:11	Einfahrt Tiefgarage	-	-	-
11:12	Halle 1, NW	2	105,0	91,0
11:15	Halle 1, NM	2	57,0	91,0
11:18	Halle 1, NO	3	26,0	86,0
11:21	Ausfahrt Tiefgarage	-	-	-

Tabelle 5.1: Protokoll von Messreihe 1.

Die X-Position in der Tabelle entspricht dabei der Fahrzeugspitze und nicht der genauen Position der WLAN-Antenne am Fahrzeugdach.

Erster Messpunkt

Das Fahrzeug wird gleich an Beginn von Spur 2 abgestellt. Mittels der unter Punkt 5.1 beschriebenen Methode wird versucht, diese Position zu errechnen. Die Analyse der Fetcher-Daten zeigt aber: es liegen für die erste Positionierung keinerlei Daten von Access Point AP 51-68 vor. Das WLAN-Gerät ist zwar im Netzwerk erreichbar, kommuniziert aber nicht mit dem SNMP-Manager. Folglich werden keine relevanten Informationen während der Messung von diesem Sender aufgezeichnet. Die Gründe dafür sind in der Infrastruktur zu suchen. Der Client versuchte zwar, eine Verbindung zu den benachbarten Geräte AP 51-59 und AP 51-68 aufzubauen, jedoch war das Zeitfenster für eine vernünftige Messung zu kurz. Der erste Messpunkt kann also nicht mittels Fingerprinting bestimmt werden und ist mit einem Ausfall des AP 51-68 begründet.

Zweiter Messpunkt

Für den zweiten Messpunkt wurde der Bus auf Spur 2 weiterbewegt. Die Messposition wurde notiert. Eine Auswahl der in diesem Zeitfenster aufgenommenen SNMP-Meldungen zeigt Tabelle 5.2.

Uhrzeit	BSSID	Location AP	Name Client	RSSI
11:16:44	IVBIBIS	IVB Halle1-51-75	631	-53
11:17:15	IVBIBIS	IVB Halle1-51-75	631	-55
11:17:46	IVBIBIS	IVB Halle1-51-75	631	-55
11:18:17	IVBIBIS	IVB Halle1-51-75	631	-55

Tabelle 5.2: SNMP Meldungen zum zweiten Messpunkt von Messreihe 1.

Die Werte dieser Signalstärken werden weder gemittelt noch anderwertig mathematisch aufbereitet. Die MAC-Adresse vom Access Point sowie RSSI von $-55dBm$ werden dem

DataCruncher übergeben. Die Ergebnisse der Auswertung werden gemittelt und es ergeben sich zwei mögliche Positionen:

AP 51-75 Position 1: X=114,3 Y=92,4

Diese Position kann aufgrund von Rahmenbedingungen sofort verworfen werden. Die X-Koordinate befindet sich zu weit westlich, als dass ein Fahrzeug dieser Länge dort abgestellt werden könnte.

AP 51-75 Position 2: X=49,7 Y=90,8

Diese ermittelte Position wäre möglich. Allerdings weicht die errechnete von der aufgezeichneten Position etwas ab. Weiters fehlt noch die Korrektur der Antennenposition. Wie bereits erwähnt, listet Tabelle 5.1 die jeweiligen Positionen der Fahrzeugspitze, und nicht die des eigentlichen WLAN-Gerätes, für welches die Site Survey die Daten besitzt. Es erfolgt eine Korrektur der händisch aufgezeichneten Position. Man erhält dadurch folgende Abweichungen:

X-Position: $(57,0 + 2,2 - 49,7 = 9,5m)$

Y-Position: $(91,0 - 90,8 = 0,2m)$

Während die Y-Position bereits zufriedenstellend berechnet wurde, bedeutet eine X-Abweichung von $9,5m$ kein passables Ergebnis. Es gilt nun zu prüfen, ob die Genauigkeit bei weiteren Messungen steigt oder fällt.

Dritter Messpunkt

Der dritte Messpunkt stellt den ersten Abstellplatz auf Spur 3 dar. Die während der Parkdauer aufgenommenen SNMP-Meldungen sind in Tabelle 5.3 gefiltert dargestellt.

Uhrzeit	BSSID	Location AP	Name Client	RSSI
11:18:49	IVBIBIS	IVB Halle1-51-58	631	-95
11:19:20	IVBIBIS	IVB Halle1-51-58	631	-95
11:19:51	IVBIBIS	IVB Halle1-51-78	631	-95
11:20:22	IVBIBIS	IVB Halle1-51-78	631	-95

Tabelle 5.3: SNMP Meldungen zum dritten Messpunkt von Messreihe 1.

Gleich erkennbar: die Dämpfung ist mit -95 recht hoch, d.h. das Signal relativ schwach. Auch wurden innerhalb des Messzeitraums keinerlei Signale von AP 51-76 gemessen. Die Daten werden trotzdem dem DataCruncher übermittelt und der RSSI-Bereich auf -80 bis -100 erweitert. Dadurch wurden insgesamt sechs Positionsmöglichkeiten ermittelt:

AP 51-58 Positionen 1-3

Alle drei Positionen von AP 51-58 sind unbrauchbar. Die Tatsache, dass sich das Fahrzeug während der Messung physikalisch weniger als 5 Meter entfernt vom Access Point befindet und trotzdem keine besseren Signalstärken erreicht werden, ist problematisch. Bereits während der Implementierungsphase zeigte dieser Access Point

Probleme (siehe verschobenes Empfangsmaximum unter Punkt 4.3.1). Dieses Gerät sollte also einer weiteren Überprüfung ausgesetzt werden und gegebenenfalls getauscht werden. Für eine Ortung über WLAN scheint es unbrauchbar.

AP 51-78 Position 4: X=130,1 Y=92,4

Nachdem Access Point 51-76 keinerlei Messages lieferte, bleibt nur noch AP 51-78 für die Auswertung. Die erste vom DataCruncher ermittelte Position erweist sich allerdings als nutzlos. Ein Fahrzeug kann praktisch an dieser Stelle nicht abgestellt werden.

AP 51-78 Position 5: X=15,1 Y=73,0

Diese errechnete Position ganz im Südosten der Halle, dürfte auf den erweiterten RSSI-Bereich zurückzuführen sein. Ansonsten ist nicht erklärbar, dass sowohl diese als auch die nächste - deutlich näher liegende - Position ermittelt werden kann. Solche Fälle müssen über die Angabe der Zuverlässigkeit an den Benutzer weitergegeben werden.

AP 51-78 Position 5: X=26,3 Y=88,0

Die letzte Position trifft die tatsächliche am besten. Es errechnen sich mit Korrektur der Fahrzeugantenne folgende Abweichungen:

X-Position: $(26,0 + 2,2 - 26,3 = 1,9m)$

Y-Position: $(86,0 - 88,0 = -2,0m)$

Die Schwankung der Y-Koordinate kann vernachlässigt werden. Die Genauigkeit ist ausreichend, um das Fahrzeug der Spur Nummer 3 zuordnen zu können. Die X-Position betreffend ist das Ergebnis sehr gut. Vorallem, wenn man die Distanz von knapp 30 Meter zwischen Fahrzeugposition und dem Montagepunkt von AP 51-78 berücksichtigt.

5.2.2 Zweite Testreihe

Die zweite Testreihe wird im südlichen Bereich von Halle 1 absolviert. Auch bei Testreihe Nummer 2 war in Halle 1 kein Verkehr vorhanden. Die Tabelle 5.4 gibt das Messprotokoll wieder.

Uhrzeit	Hallenbereich	Spur	X-Pos	Y-Pos
12:21	Einfahrt Tiefgarage	-	-	-
12:22	Halle 1, SW	5	102,0	78,5
12:26	Halle 1, SM	5	75,0	78,5
12:29	Halle 1, SO	5	25,5	78,5
12:31	Ausfahrt Tiefgarage	-	-	-

Tabelle 5.4: Protokoll von Messreihe 2.

Vierter Messpunkt

Für den vierten Messpunkt wurde der Bus (wieder Fahrzeug Nummer 631) zu Beginn vom Betriebshof in die Tiefgarage gefahren und auf Spur 5 abgestellt. Tabelle 5.5 stellt die während dieser Zeit zugeordneten SNMP-Meldungen dar.

Uhrzeit	BSSID	Location AP	Name Client	RSSI
12:21:56	IVBIBIS	IVB Halle1-51-59	631	-95
12:24:00	IVBIBIS	IVB Halle1-51-59	631	-38
12:25:34	IVBIBIS	IVB Halle1-51-59	631	-38

Tabelle 5.5: SNMP Meldungen zum vierten Messpunkt von Messreihe 2.

Es werden nur Signale von AP 51-59 empfangen. Der erste Messwert von $-95dBm$ deutet noch auf die Ein- bzw. Zufahrt hin. Erst nachdem das Fahrzeug knapp zwei Minuten am Stellplatz positioniert war, verbesserte sich der Empfang auf $-38dBm$. Die Ermittlung mittels DataCruncher ergibt:

AP 51-58 Position 1: X=104,4 Y=79,5

Der DataCruncher liefert genau eine mögliche Position. Mittels Positionskorrektur der Antenne ergeben sich folgende Abweichungen:

X-Position: $(102,0 + 2,2 - 104,4 = -0,2m)$

Y-Position: $(78,5 - 79,5 = -1,0m)$

Die Ortungsgenauigkeit ist als sehr gut zu bezeichnen. Die Abweichung in Y-Richtung ist einerseits vernachlässigbar und andererseits einer eventuellen Ungenauigkeit bei der Einmessung geschuldet.

Die Bedingung für die Positonszuordnung waren allerdings perfekt. So wurde das

Fahrzeug exakt unter dem Access Point positioniert. Andererseits wurde ja der Standort von AP 51-59 absichtlich so gewählt, dass er den Bereich der Fahrzeuge am Ende der Spuren 4, 5 und 6 optimal abdeckt.

Fünfter Messpunkt

Der fünfte Messpunkt befindet sich in der Mitte von Spur 5. Die Tabelle 5.6 listet die während dieser Zeit zugeordneten SNMP-Meldungen auf.

Uhrzeit	BSSID	Location AP	Name Client	RSSI
12:26:36	IVBIBIS	IVB Halle1-51-59	631	-66
12:27:39	IVBIBIS	IVB Halle1-51-59	631	-66

Tabelle 5.6: SNMP Meldungen zum fünften Messpunkt von Messreihe 2.

Dieser Messpunkt zeigt bewusst ein bereits beschriebenes Problem auf: das Fahrzeug wird nur knapp 30 Meter innerhalb der gleichen Spur bewegt. Der Zeitraum, in welchem diese Bewegung samt Stillstand erfolgt, liegt innerhalb von fünf Minuten. Danach wird der Bus bereits zu Messpunkt Nummer 6 bewegt. Der Client ist immer noch auf AP 51-59 angemeldet. Mit Bewegungsbeginn nimmt die Signalstärke zwar ab, für den Client ist die Qualität aber immer noch ausreichend. Obwohl nun der Bus fast direkt unter AP 51-74 platziert wird, reicht die Zeit nicht aus, einen Wechsel zu diesem Access Point zu vollziehen. Der DataCruncher muss relativ schlechte Signalwerte ($-66dBm$) verwerten, und liefert in der Folge zuviele und vorallem unbrauchbare Ergebnisse.

AP 51-58 Position 1-6:

Alle ermittelten sechs Positionen liegen außerhalb des Toleranzbereiches. Eine Ortung konnte also nicht erfolgen. Wäre das Fahrzeug noch eine bestimmte Zeitdauer an dieser Position verweilt, so hätte ein Wechsel zu AP 51-74 stattgefunden und die Ortung wäre vermutlich mit dem gleichen Ergebniss wie bei Messpunkt fünf durchgeführt worden.

Dieser Fall stellt eher eine Besonderheit dar. Im Alltag darf davon ausgegangen werden, dass Fahrzeuge nicht in dieser Geschwindigkeit umgestellt werden. Vielmehr erscheint auch die Standort-Information über diesen kurzen Zwischenhalt vom Bus als verzichtbar.

Sechster Messpunkt

Der letzte Messpunkt befindet sich am vordersten Stellplatz von Spur Nummer 6. Der Bus wurde wieder nur eine kurze Strecke weiterbewegt. Die während der Abstellung vom Fahrzeug kommunizierten SNMP-Message zeigt Tabelle 5.7.

Es wiederholt sich das gleiche Problem wie bereits bei Messpunkt Nummer 5: Der Client besitzt eine vorhandene und ausreichende Verbindung zu AP 51-77. Obwohl sich der Bus

Uhrzeit	BSSID	Location AP	Name Client	RSSI
12:30:15	IVBIBIS	IVB Halle1-51-77	631	-54
12:30:46	IVBIBIS	IVB Halle1-51-77	631	-54

Tabelle 5.7: SNMP Meldungen zum sechsten Messpunkt von Messreihe 2.

wieder in direkter Nähe zu AP 51-76 befindet, gelingt innerhalb von wenigen Minuten nicht das Ummelden auf den diesen Access Point. Der DataCruncher muss also wieder mit schlechten Messwerten von AP 51-77 arbeiten. Das Ergebnis fällt in diesem Fall jedoch besser aus:

AP 51-77 Position 1: X=35,9 Y=88,7

Diese Position wäre grundsätzlich möglich. Allerdings lässt sich aufgrund der Y-Koordinate darauf schließen, dass das Fahrzeug in Spur 3 stehen müsste. Es erscheint äußerst unlogisch, dass das Fahrzeug im nördlichen Hallenbereich einfährt, jedoch eine Netzwerkverbindung nur zu den Access Points in der Südhalle aufbaut. Aufgrund allein dieser Betrachtung kann diese Position mit einer deutlich geringeren Zuverlässigkeit angegeben werden. Des Weiteren würde man in diesem konkreten Messfall erkennen, dass auf dieser Positionsvariante bereits ein Fahrzeug geparkt ist.

AP 51-77 Position 2: X=21,9 Y=75,9

Die zweite Variante scheint deutlich plausibler zu sein. Nach der Korrektur erhält man folgende Abweichungen: X-Position: $(25,5 + 2,2 - 21,9 = 5,8m)$

Y-Position: $(78,5 - 75,9 = 2,6m)$

Die Messabweichung mit knapp 6 Metern ist für eine exakte Zuordnung zu ungenau. Dennoch erscheint das Ergebnis für den relativ kurzen Messzeitraum als brauchbar. Es darf davon ausgegangen werden, dass sich das Fahrzeug bei Verbleib an dieser Position umgemeldet hätte und der DataCruncher mit den Messdaten von AP 51-76 deutlich bessere Ergebnisse geliefert hätte und diese Position in ihre Zuverlässigkeitsangabe erhöht hätte.

5.3 Evaluierung

Die durchgeführten Tests zeigen einerseits Schwachpunkte des Systems auf, bestätigen aber andererseits unter optimalen Bedingungen die gewünschte Genauigkeit.

Vorweg muss gesagt werden, dass der Einfluss von in der Tiefgarage geparkten Fahrzeugen in der Praxis weit geringer ausfällt wie befürchtet. Dies lässt sich mit der geringen Differenz zwischen Garagen- und Fahrzeughöhe begründen.

Die Messergebnisse vom SNMP-Fetcher zeigen jedoch, dass der Sendebereich der einzelnen Access Points bei vollbesetzter Tiefgarage sehr beschränkt ist. Es bestätigte sich also die Installation weiterer WLAN-Geräte in der Tiefgarage. Vorallem in Hinblick auf die Testergebnisse scheint der Ansatz einer Redundanz sinnvoll.

Die Testergebnisse fallen unter optimalen Bedingungen sehr zufriedenstellend aus. Es zeigt sich aber als absolute Notwendigkeit, dass die Fahrzeuge über einen Zeitraum von etwa fünf Minuten an einer Position verweilen müssen, bis eine aussagekräftige Ortung möglich ist. Bei schnellen Bewegungen ist das An- und Abmeldeprozedere zu langsam. Dadurch werden nur SNMP Messages mit schlechten RSSI an den DataCruncher weitergeleitet. Generell lässt sich sagen, je schlechter das Signal desto geringer die Zuverlässigkeit einer Ortung. Es muss also versucht werden, ein möglichst starkes Signal zu bekommen.

Bei der Unterscheidung mehrerer Positionsmöglichkeiten ist die Betrachtung der Umgebung wesentlich. Gemeinsam mit Informationen aus der Vergangenheit können so Positionen genauer bestimmt bzw. komplett verworfen werden. Die Angabe der Ortungsgenauigkeit für den Anwender scheint dabei sehr wichtig.

5.4 Verbesserungsvorschläge

Die Evaluierung zeigt, dass bereits ohne große Analyse-Tools und Algorithmen eine ausreichende Genauigkeit erreicht werden kann. Es sei nochmals daraufhin gewiesen, dass die gewünschte Genauigkeit im Kontext zu sehen ist. Eine Ortung von bis zu 20 Meter langen Fahrzeugen muss nicht zwingend auf den Zentimeter genau sein.

Dennoch zeigt diese Masterarbeit, dass umfangreiches Optimierungspotential vorhanden ist. Nachfolgend eine Auswahl davon:

Position der Access Points: Halle 1 ist mit acht installierten Sendequellen recht großzügig ausgestattet. Deren Position wurde jedoch perfekt gewählt. Vorallem der Ein- und Ausfahrtsbereich scheinen unzureichend abgedeckt zu sein. In Hinblick auf eine möglichst rasche erste Erfassung eines Clients, wäre es vorallem im Ausfahrtsbereich sinnvoll, die Access Points in der Y-Achse leicht versetzt zu platzieren. Bei einer Neupositionierung sollte aber stets die Sollaufstellung in der Halle berücksichtigt bleiben und Access Points möglichst dort positioniert werden, wo sich die Fahrzeugantennen befinden.

Position der Fahrzeugantennen: Obwohl die Empfangsleistungen der Fahrzeugantennen bereits gute Ergebnisse liefern, könnten seitens der Software eine Optimierung pro Fahrzeug durchgeführt werden. Beispielsweise könnten an fix installierten Access Points Referenzmessungen durchgeführt werden. Die Waschstraße würde sich dabei gut anbieten. Die Sendequelle ist fix positioniert und die Fahrzeuge stehen während der Reinigung immer an der exakt gleichen Position.

Auch die Richtcharakteristik einer Fahrzeug-Antenne sollte analysiert werden. Die Antenne wird nicht auf 360 Grad die selben Empfangseigenschaften bieten können.

WLAN Devices vom Fahrzeug: Um einerseits die Genauigkeit und die Zuverlässigkeit zu erhöhen und andererseits eine Form der Redundanz zu realisieren, sollten alle Netzwerk-Devices eines Fahrzeuges zur Auswertung herangezogen werden. Unabhängig voneinander sollte der DataCruncher die Position bestimmen und ein weiteres Modul über die bessere Position bestimmen.

Optimierung des SNMP Fetchers: Die Abfrage-Intervalle des SNMP-Fetchers könnten noch dynamischer geschehen. Für diesen Schritt ist jedoch eine Analyse des Netzwerk-Traffics notwendig. Nur dann können die Spitzen im Netz besser abgefangen werden. Wird die WLAN-Ortung auf den gesamten Betriebshof ausgeweitet, ist ein sorgsamer Umgang mit den SNMP Walks wichtig. Unnötige Abfragen über Clients in uninteressanten AccessPoints belasten das Netzwerk nur zwecklos.

Aufbereitung der Survey Daten: Die Daten der WLAN Site Survey könnten für eine schnellere Abfrage auf bauliche Gegebenheiten angepasst werden. Zum Beispiel wäre eine Filterung auf die Y-Koordinaten sinnvoll. Ein Fahrzeug kann sich nur in der Mitte einer Fahrspur befinden.

Auch eine statistische Behandlung der Messwerte erscheint sinnvoll. In Hinblick auf bessere Fingerprinting-Ergebnisse könnte ein flächendeckendes Dreiecksnetz erstellt werden.

Analyse der Vergangenheit: Die Analyse der vergangenen Positionierungen scheint äußerst vielversprechend zu sein. Die Information, wo sich in der Halle sonst noch ein Fahrzeug aufhält dient zu einer deutlichen Steigerung der Ortungsgenauigkeit. Prinzipiell ist es wichtig, bereits für die Ortung des ersten Fahrzeuges in einer Halle eine hohe Genauigkeit zu bieten. Darauf aufbauend ist es einfacher, Fahrzeuge in einer gefüllten Tiefgarage zu lokalisieren.

Fingerprinting: Hier sollten unterschiedliche Algorithmen untersucht werden. Neuronale Netzwerke, Fuzzy Logic oder Isolinienverfahren - die Möglichkeiten scheinen sehr umfangreich.

Lernen durch Feedback: Wichtig für ein lernfähiges System ist das Feedback. Die vom System errechnete Position könnte vom User bestätigt werden. Über einen längeren Zeitraum könnten so fehlerhafte Positionierungen von der Software selbst korrigiert werden.

Kapitel 6

Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

Eine Positionsbestimmung von Fahrzeugen in Tiefgaragen mittels Wireless LAN stellt in einem Unternehmen der Größe der Innsbrucker Verkehrsbetriebe eine gute Alternative zu weit höherpreisigen, am Markt erhältlichen Ortungssystemen dar. Der Aufwand für eine ergänzende Infrastruktur ist minimal, wird bereits jetzt schon eine flächendeckende WLAN-Versorgung bereits für mehrere Systeme eines zeitgemäßen Betriebshofmanagements vorausgesetzt. Eine immer stärker werdende Vernetzung von Subsystemen verlangt ein stabiles Netzwerkkonstrukt im Hintergrund. Dazu erweist sich die Erweiterung der WLAN-Infrastruktur durch die Installation von Access Points von mehreren Seiten her als sinnvoll und nützlich.

Unter diesem Aspekt und der Voraussetzung, die Ortungsgenauigkeit in Kontext zur Fahrzeug- und Stellflächengröße zu sehen, kann mittels WLAN eine sehr gute Ortung realisiert werden. Die Genauigkeiten der Stellplatzzuordnung kann im Allgemeinen als ausreichend bezeichnet werden. Allein mittels einfacher algebraischer Funktionen erreicht man Genauigkeiten von etwa 1-2 Meter.

Wenn in Zukunft weitere Optimierungsverfahren (z.B. durch engeres Mess-Netz) zum Einsatz kommen, sind Ortungsgenauigkeiten von unter einem Meter durchaus denkbar. Es zeigt sich jedoch, dass diese Genauigkeit in der Praxis nicht zu tragen kommen wird.

Die Arbeit zeigt aber auch eines: bei der WLAN-Infrastruktur handelt es sich nicht um hochwertige Vermessungs-Hardware, sondern um einfache Kommunikationsgeräte, anhand deren Signalstärkedaten gesammelt und weitergeleitet werden. Es bedarf also gut gewählter Empfangs- und vorallem Sendeeinheiten, um dieses System zur Ortung umzusetzen. Standardhardware wird dieser Aufgabe wahrscheinlich nicht gerecht werden.

Das SNMP Protokoll stellt sich als sehr geeignete Kommunikationsvariante zur Abfrage der Signalstärken dar. Einfacher und schneller Informationsaustausch ohne großen Overhead ist dadurch möglich. Auch die Realisierung einer automatisierten Abfrage in

einem Netzwerk mit über 200 Clients ist keine komplexe Aufgabe. Für die Auswertung und Berechnung der Stellplätze sei aber eine Parallelisierung sehr empfohlen. Die aufkommenden Datenmengen müssen entsprechend sicher gehandelt werden.

Bei der Lokalisierungstechnik selbst stellt die Fingerprinting-Methode die brauchbarste Lösung dar. Sie setzt allerdings eine exakte Kalibrierungsphase voraus. Grundsätzlich kann gesagt werden, dass die Genauigkeit der Positionierung stark von der Homogenität der Umgebung abhängt. Nachdem die örtlichen Bedingungen bei der in der Masterarbeit behandelten Stellfläche grundsätzlich schlecht sind, muss eine umso genauere Analyse der Umgebung erfolgen. Die Aufnahme der Referenzdaten stellt bei einer Ortung über WLAN einen essentiellen Faktor dar.

Weiters müssen zur Erreichung einer ausreichenden Genauigkeit Rahmenbedingungen erkannt, definiert und im System berücksichtigt werden. Nur dann kann eine verlässliche Ortung stattfinden.

6.2 Ausblick

Bereits unter Punkt 5.4 wurden Verbesserungsvorschläge beschrieben. In praktischer Hinsicht wird im vorliegenden Fallbeispiel bei den Innsbrucker Verkehrsbetrieben zuerst die Ortung in Halle 1 optimiert werden. So gilt es, die Daten der Site Survey aufzubereiten und für eine schnelle Suche zu optimieren bzw. vorzufiltern. Eventuell erfolgt auch eine weitere Vermessung bei voll besetzter Garage.

Bezüglich der Fahrzeuge ist eine Untersuchung der Richtcharakteristik von den WLAN-Antennen erforderlich. Unterschiede zwischen den einzelnen Fahrzeugen sind vorhanden und sollten eliminiert werden. Die automatische Korrektur anhand einer Referenzmessung unter gleichbleibenden Bedingungen wurde bereits im Zuge dieser Arbeit empfohlen.

Funktioniert die Ortung in Halle 1 mit der gewünschten Genauigkeit und Zuverlässigkeit, kann in der Folge das System auf die beiden anderen Hallen erweitert werden. Somit wäre eine flächendeckende Ortung in der Tiefgarage realisiert. Gemeinsam mit der weiterhin bestehenden IR-Bakenortung können diese verlässlichen Informationen in das Betriebshofmanagement vollständig implementiert werden.

Mit der vollständigen Ortung in der Tiefgarage kann die automatische Garagierung erfolgen. Dabei werden den Fahrzeugen fixe Positionen zugewiesen.

Als nächster Schritt ist eine Ortung am gesamten Betriebshofgelände angedacht. Die Kombination aus GPS-Daten und einer groben WLAN-Ortung erscheint vielversprechend, zumal das Betriebshofgelände ohnehin bereits mit Wireless LAN ausgestattet werden soll.

Liegen dem BHM sämtliche Positionsdaten für Fahrzeuge am Betriebshof vor, kann im nächsten Schritt das Reservierungssystem für die Fahrdienstleitung und Werkstatt

erfolgen. Dafür ist aber eine verlässliche Lokalisierung notwendig.

Grundsätzlich scheint das Wissen über die aktuelle Fahrzeugposition am Betriebshof sehr vielseitig nutzbar und stellt eine sehr brauchbare Schnittstelle für weitere Projekte zur Verfügung.

Literaturverzeichnis

- [Agilion13] Agilion: Wireless Location System - Referenzen
<http://www.agilion.de/de/unternehmen/referenzen/wireless-location-system/public-transport>
Abgerufen am 03.02.2013.
- [BEV10] BEV - Amtsblatt für das Vermessungswesen: 3732. Erlass vom 18. Mai 2010 Standardentgelte und Nutzungsbedingungen 2010.
06.2010
- [COS13] COS online: Automatische Disposition mit dem COSware Betriebshofmanagementsystem
<http://www.cosonline.de/cosware-von-a-bis-z/betriebshofmanagement/>
Abgerufen am 03.02.2013.
- [CRN10] CRN: Siemens setzt bei Ortung auf WLAN-Tags von Ekahau
<http://www.crn.de/netzwerke-tk/artikel-3136.html>
Abgerufen am 12.07.2010.
- [DVB13] Dresdner Verkehrsbetriebe AG: EU-Forschungsprojekt SMART-WAY
<http://www.dvb.de/de/Aktuelles/DVB-Projekte/smart-way/>
Abgerufen am 13.01.2013.
- [Eisner11] C. Eisner: SNMP - Sicherheit in Applikationsprotokollen.
11.2011
- [Ekahau14] Ekahau Site Survey
<http://www.ekahau.com/wifidesign/ekahau-site-survey>
Abgerufen am 07.05.2014.
- [EKomp13] Elektronik-Kompodium: Kommunikationstechnik
<http://www.ekahau.com/wifidesign/ekahau-site-survey>
Abgerufen am 13.01.2013.
- [EKomp15] Elektronik Kompedium: IEEE 802.11 / WLAN-Grundlagen
<http://www.elektronik-kompodium.de/sites/net/0610051.htm>
Abgerufen am 02.02.2015.

- [FHD09] Fachhochschule Dortmund, U. Grossmann: Ortung mit WLAN RSSI, IKAROS Projekt.
2007
- [Fluke14] Fluke Networks: AirMagnet Survey
<http://de.flukenetworks.com/products/airmagnet-survey>
Abgerufen am 07.05.2014.
- [Fraunhofer13] Fraunhofer IIS: Laufzeitbasierte Funkortung
<http://www.iis.fraunhofer.de/de/bf/ln/technologie/laufzeitFunko.html>
Abgerufen am 07.12.2013.
- [Fuqiang11] G. Fuqiang: An improved fingerprinting method for localization WLAN-based. *IEEE Computer Science and Service System*, Seiten 2051-2054
06.2011
- [GIS12] GIS: Real Time Locating System RTLS
<http://gis.stackexchange.com/questions/40660/trilateration-algorithm-for-n-amount-of-points>
Abgerufen am 10.12.2012.
- [GPSO11] GPSO: GPS Alternativen
<http://gpso.de/technik/gsmnavi.html>
Abgerufen am 30.11.2011.
- [Grossmann07a] U. Grossmann: The accuracy of algorithms for WLAN indoor positioning and the standardization of signal reception for different mobile devices. *International Journal of Computing*, Seiten 109-109
2007
- [Grossmann07b] U. Grossmann: RSSI-basierte WLAN-Ortung mit PDA (Personal Digital Assistant) innerhalb von Gebäuden. *WCI*
2007
- [Gursch11] H. Gursch: Konzeption und Aufbau einer WiFi Indoor Lokalisierungsplattform mit Android. *Technische Universität München: Studienarbeit*
09.2011
- [Gustafsson02] F. Gustafsson und F. Gunnarsson: Positioning using time-difference of arrival measurements.
09.2002
- [Honkavirta09] V. Honkavirta: A comparative survey of WLAN location fingerprinting methods. *IEEE Positioning, Navigation and Communication*, Seiten 243-251
03.2009

- [IEEE15] IEEE Standards Association: 802.11 Wireless LANs
<http://standards.ieee.org/about/get/802/802.11.html>
Abgerufen am 13.01.2015.
- [IFEV13] TU Braunschweig - IfEV: Satellitenortung im Spuregeführten Verkehr und im ÖPNV mit GPS/DGPS
<https://www.tu-braunschweig.de/ifev/forschung/projekte/gps-schiene>
Abgerufen am 13.01.2013.
- [IVB15] Innsbrucker Verkehrsbetriebe: Unternehmensinformation
<http://www.ivb.at/de/unternehmen/ueber-uns/wissenswertes.html>
Abgerufen am 10.02.2015.
- [Ji04] Xiang Ji: Dissertation - Localization algorithms for wireless sensor network systems. Department of Computer Science and Engineering, Pennsylvania State University
01.2004
- [Linnhoff10] C. Linnhoff-Popien: WLAN Positioning. *Ludwig Maximilians Universität München: Praktikum Mobile und Verteilte Systeme*
2010
- [LRABB12] LRABB: Information über rechnergestützte Betriebsleitsysteme
<http://www.lrabb.de/site/LRA-BB-Desktop/get/3277235/2012-101-a3.pdf>
Abgerufen am 07.12.2012.
- [Macnamara10] T. Macnamara: Introduction to Antenna Placement and Installation.
2010
- [MagicMap09] Magic Map Anwendungen: VA Berlin GmbH
<http://magicmap.de/anwendungen.htm>
Abgerufen am 07.12.2009.
- [ManageEngine15] ManageEngine: OpManager SNMP tutorial
<http://www.manageengine.com/network-monitoring/what-is-snmp.html>
Abgerufen am 07.02.2015.
- [MS03] Microsoft TechNet: What is SNMP
<https://technet.microsoft.com/en-us/library/cc776379%28v=ws.10%29.aspx>
Abgerufen am 07.02.2015.
- [PRN12] PR Newswire: Ekahau entwickelt die WLAN-RTLS-Performance
<http://www.prnewswire.co.uk/news-releases/ekahau-entwickelt-die-wlan-rtls-performance-mit-einem-neuen-ortsbaken-weiter-152813245.html>
Abgerufen am 12.07.2010.

- [PSI15a] PSI: erstmals RFID-Echtzeit-Ortung im ÖPNV
<http://www.psi.de/de/no-cache/psi-pressevents/releases-archive/artikel/article/psi-realisiert-erstmals-rfid-echtzeit-ortung-im-oepnv/>
Abgerufen am 10.02.2015.
- [PSI15b] PSI: Leittechnik für Verkehr und Sicherheit
<http://www.psitrans.de/de/loesungen/betriebshof-management/>
Abgerufen am 10.02.2015.
- [Rohrig07] C. Rohrig: Mobile Robot Localization using WLAN Signal Strengths. *IEEE Workshop on Intelligent data Acquisition and Advanced Computing Systems*, Seiten 704-709
09.2007
- [RTLS10] Real Time Locating Systeme RTLS
<http://www.where2link.com/rtls-real-time-locating-rfid/rtls.aspx>
Abgerufen am 12.07.2010.
- [RTR15] Rundfunk und Telekom Regulierungs-GmbH: Frequenzen
<https://www.rtr.at/de/tk/Frequenzen>
Abgerufen am 07.02.2015.
- [Ruckus15] Ruckus: BeamFlex+ Technology
<http://www.ruckuswireless.com/technology/beamflex>
Abgerufen am 09.04.2015.
- [Saha03] S. Saha, K. Chaudhuri, D. Sanghi, P. Bhagwat: Location determination of a mobile device using IEEE 802.11b access point signals. *Wireless Communications and Networking*, Seiten 1987-1992
2003
- [Skynet15] SKYNET: Europäische Kommission regelt den 5 GHz Bereich
http://www.wlan-skynet.de/docs/rechtliches/etsi_301_893.shtml
Abgerufen am 07.02.2015.
- [SSB11] Stuttgarter SSB und PSI Transcom: Betriebshofmanagement per RFID
<http://www.vtdigital.de/VT.03.2011.102>
Abgerufen am 30.11.2011.
- [SSB12] Siemens Business Services: Funkchips steuern Busse und Bahnen
<http://www.computerwoche.de/a/funkchips-steuern-busse-und-bahnen,573225>
Abgerufen am 13.11.2012.
- [Stimmerling12] R. Stimmerling: Bernmobil - Betriebshofmanagement in der Praxis
01.2012

- [SWB12] SWB Bus und Bahn vergibt ITCS-Auftrag an Siemens VDO
[http://www.swb-busundbahn.de/bus-und-bahn/aktuelles/einzelansicht/nachricht/swb-bus-und-bahn-vergibt-itcs-auftrag-an-siemens-vdo.html?tx_ppwuks_pi1\[page\]=17&cHash=97eee77ca94314aae694ede27849a2a1](http://www.swb-busundbahn.de/bus-und-bahn/aktuelles/einzelansicht/nachricht/swb-bus-und-bahn-vergibt-itcs-auftrag-an-siemens-vdo.html?tx_ppwuks_pi1[page]=17&cHash=97eee77ca94314aae694ede27849a2a1)
Abgerufen am 07.12.2012.
- [Teker05] U. Teker: Realisierung und Evaluation eines Indoor Lokalisierungssystems mittels WLAN *Universität Bremen: Diplomarbeit*
11.2005
- [VAB09] Verkehrsautomatisierung Berlin GmbH: Tram News Heft 51 - VABdepot, 12/2009
http://www.vaberlin.de/daten/fileadmin/user_files/Fachartikel/2009_12_TramNewsHeft51_VABdepotSystemloesungen.pdf
Abgerufen am 03.04.2010.
- [VAB15] Verkehrsautomatisierung Berlin GmbH: Produkte
<http://www.vaberlin.de/daten/index.php?id=produkte-verkehrsautomatisierung>
Abgerufen am 07.02.2015.
- [VDO14] VDO: Digitale Tachographen
http://www.vdo.de/generator/www/de/de/vdo/main/products_solutions/commercial_vehicles/tachographs/tachographen_de.html
Abgerufen am 07.05.2014.
- [WIFI15] WiFi-Alliance: Definition und Zertifizierung nach dem IEEE Standard
<http://www.wi-fi.org/certification>
Abgerufen am 07.12.2012.
- [Zimmermann01] R. Zimmermann: Lokalisierung mobiler Geräte. *ETH Zürich: Fachbereich Informatik*
2001