

Diplomarbeit

Verkehrsdatenerfassung mit Bluetooth-Detektion: Möglichkeiten und Grenzen

eingereicht von Gaby Schmietendorf

geboren am 07. Juni 1985 in Berlin

Verantwortlicher Hochschullehrer: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Krimmling
Betreuer: Dipl.-Ing. Matthias Körner (TU-Dresden)
Dr. Peter Wagner (DLR)
Abgabedatum: 15.07.2011

.....
Gaby Schmietendorf

Bibliographischer Nachweis

Gaby Schmietendorf

Verkehrsdatenerfassung mit Bluetoothdetektion: Möglichkeiten und Grenzen

Technische Universität Dresden, Diplomarbeit, 2011

174 Seiten, 63 Literaturangaben, 56 Abbildungen, 16 Tabellen, 9 Formeln, 18 Anlagen, 1 CD

Technische Universität Dresden

Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“

Institut für Verkehrstelematik

Professur für Verkehrsleitsysteme und Prozessautomatisierung

Autorenreferat

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Einsatz der Bluetooth-Technologie als Verkehrsdetektor zur Erfassung von Verkehrsströmen. Sie legt die Eigenschaften und Charakteristiken dieser Technik dar und stellt diese in den Kontext gängiger Detektionsverfahren. Anhand der Betrachtung qualitativer Anforderungsaspekte sowie potentieller Einsatzbereiche werden Stärken und Schwächen der Technologie und somit die Eignung für die Verkehrserfassung auf theoretischer Ebene analysiert. Der Vergleich zu anderen Detektoren ermöglicht die Einordnung in den Gesamtkomplex der Verkehrserfassungssysteme. Eine praktische Umsetzung ermöglicht schließlich die empirisch gestützte Validierung der theoretischen Erkenntnisse und kennzeichnet die Möglichkeiten und Grenzen der Bluetooth-Technologie im Praxiseinsatz. Mit Hilfe der theoretisch und praktisch gewonnenen Erkenntnisse dieser Arbeit wird die Eignung der Bluetooth-Detektion für Anwendungen im Straßenverkehrsmanagement verdeutlicht.

Thesen zur Diplomarbeit

1. Bluetooth als Industriestandard erfährt im Kontext endnutzerbezogener Geräte des Informations- und Telekommunikationssektors eine zunehmende Verbreitung.
2. Die Funktionsweise der Bluetooth-Technologie erlaubt den Einsatz innerhalb der Verkehrserfassung.
3. Die Nutzung eines frei verfügbaren, eindeutigen Identifikationsmerkmals impliziert die Fahrzeugerkennung trotz Unabhängigkeit fahrzeugseitig zu installierender Einrichtungen.
4. Mit Hilfe der Nutzung des Bluetooth-spezifischen Inquiry-Vorgangs können Fahrzeuge anhand mitgeführter elektronischer Geräte identifiziert werden.
5. Die Bluetooth-Detektion erlaubt lediglich die Erfassung eines prozentualen Anteils der Gesamtverkehrsstärke.
6. Sowohl die Aktivierung der Bluetooth-Schnittstelle im Fahrzeug mitgeführter Geräte als auch die Detektionsreichweite begrenzt die Wahrscheinlichkeit der Fahrzeugerkennung.
7. Die Geschwindigkeit der zu detektierenden Fahrzeuge hat maßgeblichen Einfluss auf die Menge der Erfassungen.
8. Bluetooth-Detektoren sind für den Einsatz an Straßen mit bestimmten Mindestverkehrsmengen geeignet.
9. Eine Richtungsunterscheidung ist nur unter Zuhilfenahme mehrerer örtlich getrennter Bluetoothdetektoren möglich.
10. Mehrere Fahrspuren eines Fahrstreifens können nicht getrennt voneinander betrachtet werden.
11. Der fehlende Positionsbezug eines erfassten Fahrzeuges innerhalb des Detektionsbereichs impliziert Ungenauigkeiten in der Bestimmung streckenbezogener Verkehrskenngrößen wie z.B. Reisezeiten.
12. Bluetooth bietet die Möglichkeit zur Erstellung fahrzeugbezogener Bewegungsprofile, womit ggf. datenschutzrechtliche Risiken (speziell bei parallelen Funkkanälen) einhergehen.
13. Die Erstellung von Bewegungsprofilen mit Hilfe der Bluetooth-Detektion erlaubt die Aufnahme netzweiter Quelle-Ziel-Relationen.
14. Die analytische Aufbereitung der erhobenen Datensätze ist insbesondere bei der Bluetooth-Detektion entscheidend für die erzielbaren Ergebnisse.

15. Kurz- und Mittelfristige Verkehrserhebungen an bisher nicht ausgestatteten Straßen können von der Bluetooth-Detektion profitieren.
16. Die Bluetooth-Detektion besitzt hinsichtlich der Montage und Instandhaltung entscheidende Vorteile gegenüber gängigen Detektionsverfahren.
17. Eine Detektion kann auch bei Unabhängig von Stromversorgungs- und Datenübertragungsinfrastrukturen erfolgen.
18. Die Bluetooth-Detektion stellt aufgrund verfügbarer Produkte des Massenmarktes eine kostengünstige Alternative zu anderen Detektionsarten dar.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielstellung	1
1.3	Aufbau der Arbeit.....	2
2	Grundlagen zur Verkehrserfassung	5
2.1	Verkehrsablauf	5
2.2	Verkehrserhebungen.....	5
2.3	Automatische Verkehrsdatenerfassung.....	7
2.4	Verkehrsdetektoren	7
2.5	Qualitätsanforderungen.....	10
3	Grundlagen zur Funktechnik Bluetooth.....	15
3.1	Industriestandard	15
3.2	Bluetooth-Protokollstapel und -Profile	16
3.3	Bluetooth-Topologie	19
3.4	Bluetooth-Technologie.....	21
3.5	Informationsübertragung.....	25
3.6	Verbindungsaufbau	29
3.7	Reichweite	33
3.8	Datenschutz und Sicherheitsmaßnahmen	35
3.9	Einschränkungen	38

4	Bluetooth als Detektionssystem im Verkehrsbereich	41
4.1	Die Bluetooth-Technologie Detektion	41
4.1.1	Aufbau	41
4.1.2	Funktionsweise.....	43
4.2	Qualitative Beurteilung der Bluetooth-Technologie als Verkehrsdetektor	45
4.2.1	Allgemeingültige Anforderungen an Detektoren.....	45
4.2.2	Ableitung von Qualitätskriterien als Bewertungsgrundlage	53
4.2.3	Bewertung der Bluetooth-Technologie für den Einsatz als Detektor	54
4.2.4	Einordnung in den Kontext gängiger Detektionsverfahren	75
4.2.5	Zwischenfazit.....	79
4.3	Analyse potentieller Einsatzbereiche	79
4.3.1	Individualverkehr	80
4.3.2	Motorisierter Individualverkehr.....	83
4.3.3	Öffentlicher Verkehr	85
4.3.4	Verkehrsmanagement.....	90
4.3.5	Verkehrsplanung	92
4.4	Fazit	94
5	Konzeptioneller Ansatz	97
5.1	Herleitung des Untersuchungsgegenstandes	97
5.2	Herangehensweise an die empirische Untersuchung.....	98
5.2.1	Untersuchungsvorbereitung	99
5.2.2	Vorbereitende Tests.....	104
5.2.3	Vorgehensweise bei der Datenerhebung	106
5.2.4	Vorgehensweise bei der Datenaufbereitung.....	106
5.2.5	Konzept zur Datenauswertung.....	108
5.3	Fazit	111

6	Empirische Untersuchung.....	113
6.1	Prototypische Tests zur Untersuchung genereller Eigenschaften	113
6.1.1	Messaufbau	114
6.1.2	Ergebnisse	115
6.1.3	Zwischenfazit.....	124
6.2	Vorbereitung der Messungen zur Untersuchung spezieller Kenngrößen	125
6.2.1	Datenerhebung	125
6.2.2	Datenaufbereitung	126
6.2.3	Datenauswertung.....	128
6.3	Durchführung der Messungen am Testfeld „Ernst-Ruska-Ufer“	129
6.3.1	Untersuchung der Erfassungsrate.....	129
6.3.2	Untersuchung der Wiedererkennungsrates	134
6.3.3	Untersuchung der Quelle-Ziel-Relationen	137
6.3.4	Untersuchung der Reisezeiten	142
6.3.5	Untersuchung der Reisegeschwindigkeiten.....	149
6.3.6	Untersuchung der Signalstärke (RSSI).....	155
6.3.7	Zwischenfazit.....	161
6.4	Analyse potentieller Fehlerquellen	162
6.5	Fazit	164
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	167
8	Quellenverzeichnis.....	171

Erklärung

Anlagen

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Wechselwirkungen zwischen Fahrer, Fahrzeug und Umwelt	5
Abbildung 2: Klassifizierung der Datenerfassung nach Wirkungsbereich.....	9
Abbildung 3: Gegenüberstellung der Bluetooth-Schichten zum OSI-Modell.....	17
Abbildung 4: Zusammenhang zwischen Protokollen und Profilen.....	19
Abbildung 5: Piconetze mit (a) einem Master und einem Slave, (b) einem Master und mehreren Slaves sowie (c) ein Scatternetz, bestehend aus drei Piconetzen	21
Abbildung 6: Prinzip Frequenzsprungverfahren.....	22
Abbildung 7: Prinzip von Spread-Spectrum.....	23
Abbildung 8: Frequenzsprung-/Zeitduplexverfahren (Frequency Hopping Spread Spectrum)	23
Abbildung 9: Bluetooth-Paket-Format mit Zugangscodenaufschlüsselung	27
Abbildung 10: Sniff-Prinzip	31
Abbildung 11: Hold-Prinzip	32
Abbildung 12: Park-Prinzip	32
Abbildung 13: Betriebsmodi von Bluetooth-Geräten.....	33
Abbildung 14: Aufbau des beim DLR entwickelten Bluetooth-Detektors.....	43
Abbildung 15: Prinzipsskizze der Bluetooth-Detektion	44
Abbildung 16: Positionen von Detektoren im Straßenraum	51
Abbildung 17: Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit eines Fahrzeuges und dem Erfassungsradius eines Bluetooth-Detektors.....	59
Abbildung 18: schematisches Prinzip der Reisezeitbestimmung	65
Abbildung 19: Reisezeitdaten auf Basis verschiedener Datengeber.....	78
Abbildung 20: Reisezeitendaten auf Bluetooth-Basis [HOYE11].....	94
Abbildung 21: Schema zur Herangehensweise an die empirische Untersuchung	99
Abbildung 22: Übersichtskarte mit Messstandorten	101
Abbildung 23: Lage des Referenzmesssystems (Induktivschleifendetektoren)	104

Abbildung 24: ausgewähltes Messfeld für die prototypischen Freiflächenmessungen	105
Abbildung 25: Skizze zum Versuchsaufbau für Test der Wiedererkennungsrates auf Messstrecke.....	105
Abbildung 26: Einordnung der Datenaufbereitung in den Auswertungsprozess.....	107
Abbildung 27: Übersicht über die Untersuchungsschwerpunkte	109
Abbildung 28: Anzahl der Matches und daraus ermittelte Reisezeit am 12.7.2010, stadteinwärts, 1 Stunde	117
Abbildung 29: Messaufbau zur Untersuchung der Ansprechgeschwindigkeiten	122
Abbildung 30: Anzahl der erfassten Fahrzeuge pro Detektor und Tag	130
Abbildung 31: Übersicht mit Schleifen und markierten Blubs sowie Bezeichnung der Schleifen mit Nummern	131
Abbildung 32: grafische Darstellung der prozentualen Verteilungen der Erfassungsrates je Detektor und Tag.....	133
Abbildung 33: absolute Wiedererkennungsmengen über den Tag	134
Abbildung 34: separate Darstellung der Verteilung der absoluten Wiedererkennungen über den Tag bezogen auf mehrere sowie für einen Detektor	135
Abbildung 35: Wiedererkennungsrates	136
Abbildung 36: sinnvolle Wiedererkennungsrelationen.....	137
Abbildung 37: Quelle-Ziel-Matrix für Mittwoch, den 23.03.2011.....	138
Abbildung 38: Kiviat-Diagramme zur grafischen Veranschaulichung der Verteilung der Routenströme	139
Abbildung 39: Prozentuale Verteilung der Routenströme für den 23.03.2011	140
Abbildung 40: Verteilung der Routenströme auf Basis der Referenzmessung für den 23.03.2011.....	141
Abbildung 41: Verteilung der Reisezeit-Mittelwerte (nicht bereinigt) für den 22.03.2011.....	143
Abbildung 42: Verteilung der Reisezeit-Mittelwerte (bereinigt) für den 22.03.2011.....	144
Abbildung 43: Verteilung der Reisezeit-Mediane für den 22.03.2011 (nicht bereinigt).....	145
Abbildung 44: Verteilung der Reisezeit-Mediane für den 22.03.2011 (bereinigt).....	145

Abbildung 45: 2D-Reisezeit-Klassen-Histogramm für den 22.03.2011	146
Abbildung 46: 3D-Reisezeiten-Histogramm für den 22.03.2011	147
Abbildung 47: Oberflächenansicht des 3D-Diagramms für den 22.03.2011.....	148
Abbildung 48: 2D-Diagramm mit Reisezeitverläufen für Reisezeiten ≤ 5 Minuten	148
Abbildung 49: Geschwindigkeitsmessung ab Blub 4 für den 21.03.2011	151
Abbildung 50: Mediane der Geschwindigkeitsmessung an Blub 3 für den 21.03.2011.....	152
Abbildung 51: Gegenüberstellung der zwei Varianten der Geschwindigkeitsberechnung (Mediane) exemplarisch für den 21.03.2011.....	153
Abbildung 52: Geschwindigkeitsvergleich zwischen Blub 3 und Referenz.....	155
Abbildung 53: Signalstärkeverlauf eines sich bewegenden Fahrzeuges innerhalb einer nahezu idealen Umgebung.....	156
Abbildung 54: RSSI-Verläufe der Mac-Adresse „00:00:00:B2:D5:C4“ für den 24.03.2011 ...	157
Abbildung 55: RSSI-Verlauf der MAC-Adresse „00:00:00:B3:4F:BD“ am 24.03.2011	159
Abbildung 56: RSSI-Verlauf der MAC-Adresse „00:00:00:EE:5E:B6“ am 24.03.2011.....	160

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Qualitätsdimensionen	12
Tabelle 2:	Bestandteile des Paketkopfes	28
Tabelle 3:	Bluetooth-Leistungsklassen	34
Tabelle 4:	Einschränkungen basierend auf Bluetooth-Eigenschaften	39
Tabelle 5:	TLS-Fahrzeugklassifizierung.....	56
Tabelle 6:	Kostenkalkulation für einen autarken Bluetooth-Detektor	72
Tabelle 7:	Minimale und Maximale Temperaturen der Messwoche	106
Tabelle 8:	Ergebnisse der Messstrecken-Tests	115
Tabelle 9:	Ergebnisse der Freiflächen- und Parkplatzmessungen	119
Tabelle 10:	Anzahl der Erfassungen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten und für verschiedene Anzahlen von Inquiry-Geräten	123
Tabelle 11:	Veranschaulichung der Datensortierung	127
Tabelle 12:	Veranschaulichung der Reduzierung der sortierten Liste.....	128
Tabelle 13:	Blubs und dazugehörige Schleifendetektoren-Nummern	131
Tabelle 14:	Erfassungsraten je Detektor und Tag in Prozent	132
Tabelle 15:	Gegenüberstellung der absoluten und prozentualen Anteile der Verteilung der Routenströme für den 23.03.2011	141
Tabelle 16:	Zusammenfassung der prozentualen Verteilungen der Routenströme je Tag	142

Abkürzungsverzeichnis

ACL	Asynchronous Connection Less Link
Akku	Akkumulator
AMA	Active Member Address
AP	Access Point
ARM	Advanced Risk Machine
ARQN	Acknowledge Request Number
BIBO	Be-In-Be-Out
Blub	Bluetooth-Box (Bluetooth-Detektor)
BT	Bluetooth
CAC	Channel Access Code
CICO	Check-In-Check-Out
CRC	Cyclic Redundancy Check
DAC	Device Access Code
DPSK	Digital Phase Shift Keying
DV	Data Voice
EDR	Enhanced Data Rate
EFM	Elektronisches Fahrgeldmanagement
FCD	Floating Car Data
FEC	Forward Error Correction
FHS	Frequency Hopping Synchronisation
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
FSK	Frequency Shift Keying
Fzg	Fahrzeug
GFSK	Gaussian Frequency Shift Keying
GPS	Global Positioning System

IAC	Inquiry Access Code
ISM	Industrial Scientific Medical
IT/TK	Informationstechnologie und Telekommunikation
ITCS	Intermodal Transport Control System
IV	Individualverkehr
Kfz	Kraftfahrzeug
L ² CAP	Logical Link Control and Adaptation Protocol
LAN	Local Area Network
LC	Link Control
Lkw	Lastkraftwagen
LLC	Logical Link Layer
LM(P)	Link Manager (Protocol)
LSA	Lichtsignalanlage
MAC	Media Access Code
MIV	Motorisierter Individualverkehr
OD-Matrix	Origin-Destination-Matrix
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
OSI	Open Systems Interconnection
ÖV	Öffentlicher Verkehr
PAN	Personal Area Network
PDA	Personal Digital Assistant
PIN	Personal Identification Number
Pkw	Personenkraftwagen
PMA	Parked Member Address
PPP	Point-to-Point-Protocol
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying

RBL	rechnergestützte Betriebsleitsysteme
RF	Radio Frequency
RFCOMM	Radio Frequency Communication
RISC	Reduced Instruction Set Computer
RSSI	Receiver Signal Strength Indicator
SCO	Synchronous Connection Oriented Link
SD	Storage Device
SDP	Service Discovery Protocol
SEQN	Sequence Number
SMS	Short Message Service
TCP	Telephony Control Protocol
TCP/IP	Transmission Control Protocol
TDD	Time Division Duplex
TEU	Traffic Eye Universal
TSA	Transport Security Agency
USB	Universal Serial Bus
VDV	Verband Deutscher Verkehrsunternehmen
WLAN	Wireless LAN
WPAN	Wireless PAN

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die kontinuierlich ansteigende Verkehrsbelastung auf deutschen Straßen, die als Abbild der wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Entwicklung gesehen werden kann, stellt den Verkehrsablauf vor täglich neue Herausforderungen. Staus und zähflüssiger Verkehr prägen das Verkehrsgeschehen vor allem in städtischen Bereichen mit enger Bebauung. Die Mobilität, die seit jeher ein menschliches Grundbedürfnis darstellt, nimmt gleichzeitig aufgrund immer höherer Flexibilitätsanforderungen insbesondere im Beruf stetig zu. Demgegenüber stoßen bauliche Maßnahmen zur Erhöhung der Kapazitäten an ihre Grenzen.

Als geeignetes Mittel zur besseren Ausnutzung verkehrstechnischer Ressourcen wird daher das Verkehrsmanagement gesehen. Mit dessen Hilfe sollen auf Basis geeigneter Steuerungs- und Beeinflussungsmaßnahmen die vorhandenen Verkehrsanlagen effizienter genutzt, der Verkehrsfluss optimiert und damit die Verkehrsbelastung gesenkt werden. Voraussetzung für angemessene Maßnahmen ist diesbezüglich eine umfassende Analyse des Verkehrszustandes. Neben historischen Verkehrsdaten sind insbesondere aktuelle Daten für die Auswahl und Umsetzung der erforderlichen verkehrsbeeinflussenden Maßnahmen notwendig. Der Datenerfassung kommt daher innerhalb des Verkehrsmanagements eine besondere Bedeutung zu.

Üblicherweise genutzte stationäre, querschnittsbezogene Detektionssysteme wie beispielsweise Induktionsschleifen sind aufwändig in der Installation und kostenintensiv. Ihr Einsatz ist vor allem für die längerfristige bzw. dauerhafte Datenerfassung geeignet. Strecken- und netzbezogene Kenngrößen können mit diesen Detektoren nur bedingt erfasst werden. Hierfür eignen sich stattdessen z.B. Videokameras. Diese sind jedoch stark witterungsabhängig und im Betrieb ebenfalls zeit- und kostenaufwändig. Ein schnell und einfach zu installierendes System, das in der Lage ist, kurzfristig Tendenzen des Verkehrsablaufs aufzunehmen und dabei in Betrieb und Instandhaltung zeit- und kostenarm ist, fehlt bisher.

Als neuer Ansatz wurde vor wenigen Jahren die Bluetooth-Technologie für die Verkehrserfassung entdeckt. Diese ermöglicht die Fahrzeugerkennung auf Basis der Erfassung von im Fahrzeug mitgeführten bluetoothfähigen Geräten. Aufgrund der Verfügbarkeit eines eindeutigen Identifikationsmerkmals jedes Bluetooth-Gerätes können Fahrzeuge unabhängig von zusätzlichen, fahrzeugseitig zu installierenden Einrichtungen identifiziert werden. Dies konnte bisher nur mit Hilfe der automatischen Kennzeichenerhebungen per Videokamera realisiert werden.

1.2 Zielstellung

Allgemeines Ziel der vorliegenden Arbeit soll es sein, die Eignung der Bluetooth-Technologie für Anwendungen im Straßenverkehrsmanagement zu bewerten. Der Be-

zugsbereich konzentriert sich auf die Erfassung des motorisierten Individualverkehrs im innerstädtischen Raum. Im Einzelnen sollen dafür die folgenden Zielstellungen verfolgt werden.

Ziele im Kontext der theoretischen Analyse:

- Recherche der verfügbaren Arbeiten zur Nutzung der Bluetooth-Technologie im Verkehrsbereich.
- Herleitung qualitativer Anforderungen an Detektionssysteme und darauf aufbauend Bewertung der bluetoothgestützten Detektoren.
- Identifikation der Besonderheiten von Bluetooth-Detektoren gegenüber klassischen Erfassungssystemen.
- Analyse potentieller Einsatzszenarien der Bluetooth-Detektoren für Planung und Management von Verkehrsströmen.

Ziele im Kontext des praktischen Empirieteils:

- Erarbeitung eines Konzeptes zur Verwendung der Bluetooth-Detektoren im praktischen Umfeld mit Bezug auf den Bereich an innerstädtischen Kreuzungen.
- Validierung ausgewählter Aspekte der Verkehrsstromanalyse mit Hilfe konkreter Messreihen.

Mit Hilfe der theoretisch und praktisch gewonnenen Erkenntnisse werden die Stärken und Schwächen der Bluetooth-Technologie verdeutlicht. Auf dieser Grundlage können betriebswirtschaftliche Implikationen und Potentiale zur Nutzung dieser Technologie innerhalb des Verkehrsmanagements aufgezeigt werden.

1.3 Aufbau der Arbeit

Zum Erreichen der Ziele gliedert sich die Arbeit insgesamt in 7 Kapitel, wobei inhaltlich die beiden oben genannten Schwerpunkte (theoretischer Analyseteil und praktischer Empirieteil) gesetzt wurden. Im Folgenden werden die Inhalte der einzelnen Kapitel vorgestellt.

In Kapitel 2 werden die notwendigen Grundlagen zur Begriffsbestimmung des Gesamtkomplexes der Verkehrserfassung gelegt. Hierfür werden zunächst der Begriff des Verkehrsablaufs definiert und die verschiedenen Methoden der Verkehrserhebung dargestellt. Es folgt eine Eingrenzung auf die automatische Verkehrsdatenerfassung, die in dieser Arbeit im Fokus der Betrachtung steht. Anschließend werden die zur automatischen Erhebung von Verkehrsdaten notwendigen Erfassungseinrichtungen (Verkehrsdetektoren) in ihrer Begrifflichkeit definiert sowie deren Aufgaben erläutert. Eine Übersicht zu den verschiedenen Detektionsarten und den Klassifizierungskriterien gibt einen Überblick über den derzeitigen Stand der Technik. Die Darstellung genereller Qualitätsanforderun-

gen im Hinblick auf die Datenqualität und die Qualität der Datenerfassung rundet den verkehrstechnischen Grundlagenteil ab.

Im nachfolgenden Kapitel 3 wird weiterführend auf die Grundlagen der Funktechnik Bluetooth eingegangen. Es werden der Aufbau und Funktionsprinzipien, spezielle Charakteristiken und Eigenheiten sowie datenschutzrechtliche Aspekte beleuchtet. Mit Hilfe dieses Kapitels soll ein Grundverständnis für die Technologie erzeugt werden, das es ermöglicht, die darauf aufbauende interdisziplinäre Verwendung innerhalb des Verkehrsbereichs nachvollziehen zu können.

In Kapitel 4 erfolgt schließlich die Verknüpfung beider Themenbereiche. Dafür wird einleitend die konkrete Funktionsweise sowie der Aufbau eines Verkehrsdetektors auf Bluetoothbasis erläutert. Weiterführend wird anhand der allgemeingültigen Anforderungen, die generell an Verkehrsdetektoren gestellt werden, sowie aufbauend auf einer eingehenden Literaturstudie die Eignung der Bluetooth-Technologie für den Einsatz als Detektionssystem im Verkehrssektor qualitativ bewertet. Es wird dabei insbesondere auf die Kriterien Datenerfassung, Handhabung, Wirtschaftlichkeit und Einsatzbereich eingegangen. Der Vergleich zu anderen Detektoren, der ebenfalls auf Basis dieser Kriterien erfolgt, ermöglicht die Einordnung der Bluetooth-Methode in den Kontext gängiger Detektionsverfahren. Eine abschließende Analyse potentieller Einsatzbereiche zeigt die möglichen Anwendungsbereiche auf.

Um die zuvor erarbeiteten, theoretischen Erkenntnisse empirisch zu untermauern, folgt schließlich im zweiten Teil die Darstellung der empirischen Untersuchung, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurde.

Dafür wird in Kapitel 5 zunächst der Untersuchungsgegenstand hergeleitet. Als Ziel der empirischen Arbeit stehen dabei die Anwendbarkeit der Bluetooth-Detektionsmethode im praktischen Umfeld sowie die Eignung der Technologie für ein städtisches Verkehrsmanagementsystem im Fokus der Untersuchung. Kapitel 5 gibt hierbei die strukturelle Herangehensweise vor. Es werden die einzelnen Schritte, die im Vorfeld der eigentlichen Untersuchung notwendig sind, sowie die Vorgehensweise bei der Datenaufbereitung und der Datenerhebung erarbeitet. Mit dem Konzept zur Datenauswertung werden schließlich die konkreten Untersuchungsschwerpunkte festgelegt.

Es folgt in Kapitel 6 die Aufbereitung der Messergebnisse. Dazu werden einleitend der Aufbau und die Ergebnisse der prototypischen Tests, die vorab stattfanden und einen Eindruck von der Arbeitsweise der entwickelten Detektoren vermitteln sollten, ausgewertet. Daran anschließend wird die eigentliche Hauptmessung für ein ausgewähltes Messfeld vorgestellt. Die Umsetzung der Datenerhebung, Datenaufbereitung und Datenauswertung werden beschrieben. In einzelnen Unterkapiteln werden dann die Ergebnisse der Messung getrennt nach Untersuchungsschwerpunkten dargelegt und interpretiert. Besonderes Augenmerk liegt bei dieser empirischen Untersuchung auf der Ermittlung spezieller verkehrstechnischer Kenngrößen wie beispielsweise Reisezeiten, Ge-

schwindigkeiten, Erfassungs- und Wiedererkennungsraten sowie Quelle-Ziel-Beziehungen. Abschließend werden potentielle Fehlerquellen diskutiert.

Im letzten Kapitel werden die gewonnenen Ergebnisse dieser Arbeit zusammenfassend dargelegt. Ein Ausblick auf das Potential der Verkehrserfassung mittels Bluetooth sowie weiterführende Datenerfassungstechnologien, die ebenfalls eine sinnvolle Ergänzung darstellen würden, rundet die Arbeit ab.

2 Grundlagen zur Verkehrserfassung

2.1 Verkehrsablauf

Der Verkehrsablauf ist die „Gesamtheit der räumlich-zeitlichen Bewegungsvorgänge von Fahrzeugen im Straßenraum“. Die Bewegungsvorgänge implizieren dabei sowohl das „Fahren in einer Richtung [...] mit konstanter Geschwindigkeit, Beschleunigung, Bremsen und Anhalten“ sowie die Änderungen der Bewegungsrichtung beim „Kreuzen, Aus- und Einfädeln, Überholen, Ein- und Ausbiegen und Verflechten.“ Als Fahrzeuge im Straßenraum sind neben dem individuellen Pkw-Verkehr auch Lkw, Motorräder, Fußgänger, Fahrradfahrer und der öffentliche Personennahverkehr wie Busse oder der schienengebundene Verkehr gemeint. [WERM02]

Entscheidend für den Verkehrsablauf ist, dass der einzelne Verkehrsteilnehmer im Sinne der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion nicht losgelöst von seiner Umgebung betrachtet werden kann, sondern in Wechselbeziehung zu anderen Verkehrsteilnehmern und den umgebenden infrastrukturellen sowie umweltspezifischen Randbedingungen steht (siehe Abbildung 1). Als solche gelten entsprechend des Handbuches für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen Wegbedingungen, Verkehrsbedingungen, Steuerungsbedingungen und allgemeine äußere Bedingungen. [FGSV01]

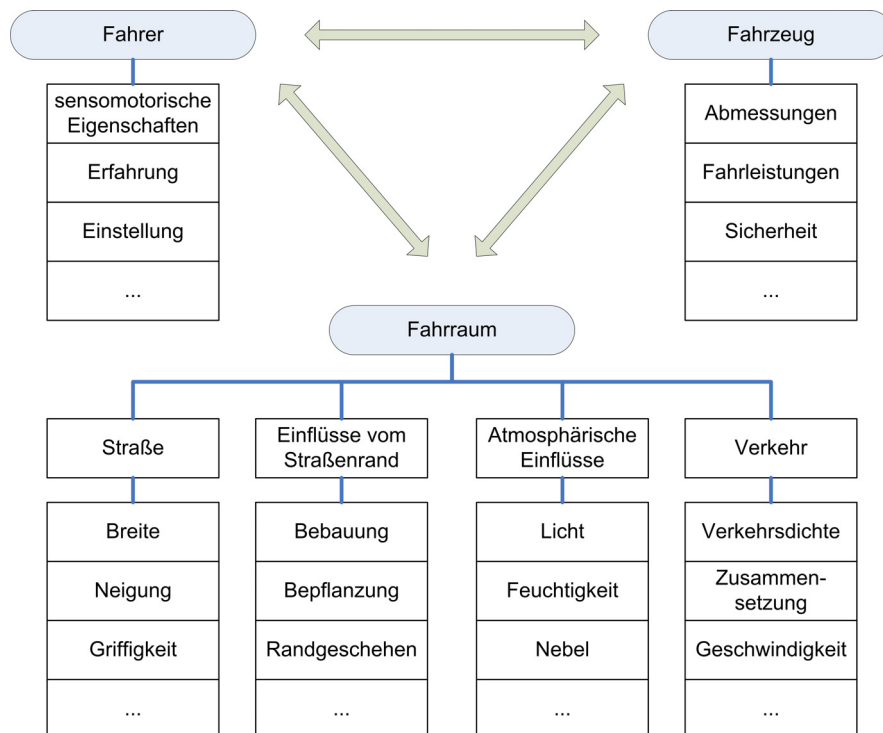


Abbildung 1: Wechselwirkungen zwischen Fahrer, Fahrzeug und Umwelt nach [WERM02]

2.2 Verkehrserhebungen

Verkehrserhebungen dienen der systematischen Beschaffung von Informationen. Zu diesen Informationen zählen beispielsweise die Auslastung der vorhandenen Kapazitäten,

die dem Leistungsangebot von Seiten der Verkehrsplanung und des Verkehrsmanagements entsprechen, oder auch daraus abgeleitete Informationen wie z.B. die Qualität des Verkehrsablaufs. Verkehrserhebungen stellen demnach ein wichtiges Werkzeug für eine planvolle und wirtschaftliche Verbesserung der Verkehrssysteme dar. [EMVE91]

Verkehrserhebungen dienen neben dem reinen Erkenntnisziel aus dem quantitativen Erfassen und Beschreiben des Verkehrsgeschehens auch der Erforschung der Ursachen für die Entstehung von Verkehr, der inneren Zusammenhänge und Abhängigkeiten sowie der Verhaltensweisen der einzelnen Verkehrsteilnehmer bzw. -teilnehmergruppen. [EMVE91]

Grundsätzlich unterscheidet man daher zwei Erhebungsmethoden im Verkehrsbereich, wobei je nach Aufgabenstellung nur einzelne Verkehrsarten oder das gesamte Verkehrsgeschehen für die Erhebung in Betracht gezogen werden [EMVE91]:

- **Verkehrstechnische Erhebungen** (manuelle/automatisierte Zählungen): Bei den verkehrstechnischen Erhebungen werden die Ortsveränderungen von Personen und Gütern auf den Verkehrswegen eines Untersuchungsraumes aufgenommen. Sie werden insbesondere in Verkehrsplanung und Verkehrstechnik zur Erfassung von Einzelverkehren eingesetzt.
- **Verhaltensbezogene Erhebungen** (Beobachtungen und Befragungen): Die verhaltensbezogenen Erhebungen beleuchten die Art und das Maß der Verkehrsteilnahme und erfassen die realisierten Verkehrsaktivitäten von Personen. Aufgrund der Betrachtung des Gesamtverkehrs (sowohl öffentlicher Verkehr, motorisierter individueller Verkehr als auch Rad- und Fußgängerverkehr) stellen sie eine wichtige Grundlage zur Erarbeitung von Wechselbeziehungen dar.

Verkehrszählungen geben Aufschluss über die räumliche und zeitliche Verteilung von Verkehrsströmen, wohingegen Beobachtungen auf äußere Merkmale und aktuelle, sichtbare Verhaltensweisen der Verkehrsteilnahme von Personen abzielen. Informationen über die Verhaltenshintergründe spielen hierbei keine Rolle. Mit Hilfe von Befragungen lassen sich im Gegensatz dazu erinnerte (bereits getätigte) und/oder beabsichtigte Verkehrsaktivitäten und Verkehrsverhaltenshintergründe von Personen auf Basis realer zeit-, raum- und soziodemografischer Bezüge ermitteln. [EMVE91]

Die Auswahl geeigneter Erhebungsmethoden richtet sich nach dem Erhebungsziel. Für kurzzeitige Straßenverkehrszählungen werden überwiegend manuelle Methoden (z.B. mit Hilfe von Strichlisten und Handzählgeräten) eingesetzt, mit denen die Fahrzeuge gezählt werden, die einen bestimmten Zählquerschnitt durchfahren. Bei langfristigen Zählungen zur Beurteilung von Verkehrsentwicklungen und für die Ermittlung aktueller Verkehrsdaten zur Steuerung und Beeinflussung des Verkehrsablaufs kommen dagegen automatische Verkehrszählanlagen zum Einsatz. Für die verhaltensbezogenen Erhebungen stehen Beobachtungen und Befragungen in Form mündlicher, schriftlicher oder telefoni-

scher Interviews zur Verfügung. Abgefragt werden das Nutzungsverhalten, Gewohnheiten und Wünschen der jeweiligen Einzelpersonen oder ganzer Personengruppen. [EMVE91], [BAUM08], [STEI05]

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich ausschließlich mit automatischen Verkehrszählanlagen.

2.3 Automatische Verkehrsdatenerfassung

Die automatische Verkehrserhebung stellt eine wesentliche Grundlage zur Beurteilung des Verkehrsablaufs im Bereich des Verkehrsmanagements dar. So ermöglicht erst die Ermittlung aktueller Verkehrsdaten, die Aufschluss über die vorliegende Verkehrssituation gibt, einen gezielten Eingriff im Hinblick auf eine strategisch sinnvolle Verkehrssteuerung.

Die Ermittlung von Verkehrsdaten wird unter dem Begriff der Verkehrsdatenerfassung zusammengefasst und impliziert „alle erforderlichen Maßnahmen und Geräte [...], die zum Messen von Kenngrößen des Verkehrsablaufs notwendig sind.“ [FGSV06]

2.4 Verkehrsdetektoren

Die Verkehrsdatenerfassung und somit die Realisierung von Verkehrserhebungen erfolgt, wie in Abschnitt 2.2 benannt, neben herkömmlichen manuellen Methoden mit Hilfe automatischer Verkehrszählanlagen. Diese automatischen Erfassungseinrichtungen werden als sog. Verkehrsdetektoren bezeichnet: „Detektoren sind Geräte zur automatischen Erfassung von Zuständen und Zustandsänderungen sowie von besonderen Merkmalen und Eigenschaften des Verkehrs“ [FGSV91]. Die automatische Datenerfassung bietet gegenüber manuellen Erhebungen einen entscheidenden Vorteil: „Zufallsfehler, die in einer aus Kostengründen häufig nur einmaligen und oft nur auf wenige Stunden beschränkten manuellen Erhebung an einem Stichtag liegen, [werden] durch die längere Erhebungsdauer wesentlich verringert [...]“ [FGSV87]

Ein Detektor besteht aus einem Sensor, der die eigentliche Erfassungs- bzw. Wahrnehmungseinrichtung des Detektors darstellt und einer Auswerteschaltung [FGSV91]. Der Sensor selbst ist ein technisches Gerät, das physikalische Größen (z.B. Druck, Strahlung, Temperatur usw.) und deren Änderungen in der Umgebung erfasst und in auswertbare elektrische Signale umwandelt [EISS96]. Mit der Weiterleitung dieser Signale an eine zentrale Steuerung wird deren Auswertung und Verarbeitung im Hinblick auf eine weitere Nutzung z.B. zu Beeinflussungszwecken möglich.

„Detektoren lassen sich unterscheiden nach der physikalischen Arbeitsweise, der verkehrstechnischen Verwendung, den Mess- und Ausgabegrößen oder der bautechnischen Anwendung“ [FGSV91]. Insgesamt existiert eine Vielzahl verschiedener Unterscheidungsmerkmale, auf deren Basis die Klassifizierung der Detektoren erfolgen kann. Eine einfache Typisierung teilt beispielsweise die Detektoren in aktive und passive Datenerfassungsgeräte ein, wobei aktive Geräte bevorzugt physikalisch passive Eigenschaften

der Verkehrsteilnehmer ausnutzen und passive Detektoren auf deren physikalisch aktive Eigenschaften ansprechen. Technisch und physikalisch lässt sich diese Unterteilung jedoch nicht immer eindeutig festlegen. Zur Gruppe der passiven Detektoren gehören z.B. pneumatische Bodenschwellen, die auf das Fahrzeuggewicht reagieren oder auch Anforderungstaster (Drucktaster), wie sie zumeist im Bereich von Fußgängerquerungen an Lichtsignalanlagen eingesetzt werden. Aktive Detektoren hingegen nutzen z.B. das Reflexionsvermögen von Kraftfahrzeugen für Schall- oder elektromagnetische Strahlungsenergie aus. Viele der heutzutage in der Verkehrstechnik eingesetzten Detektoren, wie z.B. Induktionsschleifen-, Radar- und auch Infrarot-Detektoren zählen in diese Kategorie. [FGSV91]

Detektoren lassen sich nach folgenden Merkmalen unterscheiden [FGSV91]:

- physikalische Arbeitsweise (Messprinzip),
- verkehrstechnische Verwendung,
- Mess- und Ausgabegrößen,
- bautechnische Anordnung,
- Wirkungsbereich,

Eine differenziertere Unterscheidung bietet die Klassifizierung anhand des zugrunde liegenden Messprinzips, nach dem die Detektoren in Gruppen entsprechend ihrer physikalischen Arbeitsweise eingeteilt sind (siehe Anlage A).

Bei der verkehrstechnischen Verwendung wird zwischen den jeweiligen verkehrstechnischen Zielvorstellungen unterschieden – diese richten sich nach dem gewählten Steuerungsverfahren und den dabei verwendeten Verkehrskenngrößen (z.B. Anwesenheitserkennung, Zählen, Richtungs- und Fahrzeugerkennung, Geschwindigkeitserfassung oder auch ÖPNV-Bevorrechtigung). [FGSV91]

Bei der Klassifizierung nach Mess- und Ausgabegrößen basiert die Unterscheidung auf den Grundinformationen, die die Detektoren liefern und anhand derer letztendlich die Ermittlung der Verkehrskenngrößen erfolgt. Als Messgrößen gelten die An- und Abwesenheit von Fahrzeugen im Wahrnehmungsbereich des Detektors. Impulse, Verweilzeiten (Anwesenheitszeiten) sowie Abwesenheitszeiten, die beim Durchfahren des Wahrnehmungsbereichs entstehen, werden dagegen als Ausgabegrößen bezeichnet. [FGSV91]

Die bautechnische Anordnung spiegelt die Klassifizierung anhand des Detektorstandortes wieder. Die Anordnung kann in, auf, neben oder über der Verkehrsfläche erfolgen. [FGSV91]

In der Praxis üblich ist die Klassifizierung anhand des räumlichen Wirkungsbereichs wie sie in Abbildung 2 skizziert ist. Hierbei wird die Datenerfassung nach stationärer und mo-

biler Erfassung unterschieden, die sich wiederum in querschnitts- und streckenbezogene sowie fahrzeugbezogene Detektion einteilen lässt.

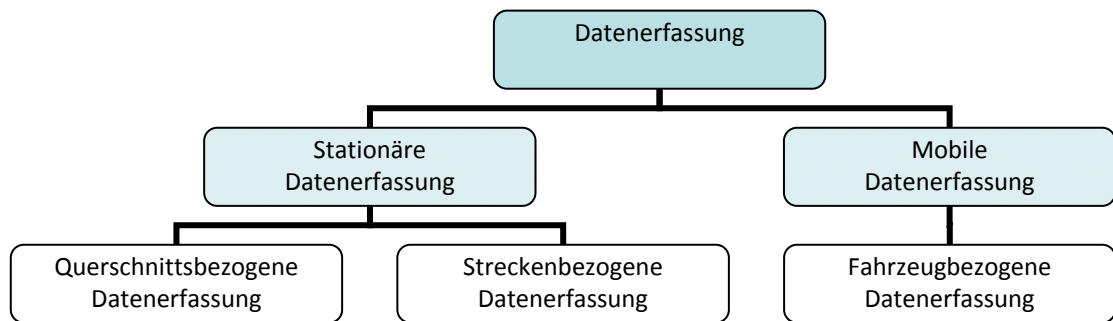


Abbildung 2: Klassifizierung der Datenerfassung nach Wirkungsbereich [SCHM10]

Die in der Verkehrsdatenerfassung überwiegend zur Anwendung kommenden straßenseitig installierten, querschnittsbezogenen Detektionseinrichtungen stellen punktuelle Messungen an einem Streckenpunkt (Messquerschnitt) dar, an denen Größen wie z.B. die Geschwindigkeit, Verkehrsstärke, Verkehrsdichte oder auch Zeitlücken erfasst werden. Die Ausgabe erfolgt zumeist als Einzelfahrzeugdaten, die mit einem Zeitstempel versehen werden, oder als bereits über ein Zeitintervall aggregierte Größen. „Die Messung an lokalen Punkten ermöglicht [zudem][...] die Berücksichtigung von Einflussgrößen der Fahrwegeigenschaften wie Straßenart, Anzahl der Fahrstreifen, Steigung, Kurvigkeit oder Fahrbahnbreite“ [FGSV05]. Vertreter dieser Detektionsart sind die im Straßenverkehr gängigen Induktionsschleifendetektoren. Im Gegensatz dazu beziehen sich die streckenbezogenen Detektoren auf einen bestimmten Streckenabschnitt, der z.B. mittels Videodetektion erfasst wird und dessen Auswertung auf Basis spezieller Modelle und Bilderkennungsalgorithmen erfolgt. Zusätzlich zu Verkehrsstärken und -dichten können mit dieser Detektionsart auch die Zusammensetzung des Verkehrs oder das Verhalten der Verkehrsteilnehmer untereinander gemessen werden. Die sich ständig ändernden Fahrwegeigenschaften über der Strecke können hiermit jedoch nur schwer erfasst werden.

Die fahrzeugbezogene Detektion bezeichnet dem gegenüber die mobile Verkehrslageerfassung mittels Einrichtungen des im Verkehrsfluss mitfahrenden Fahrzeugs. Neuere Technologien wie z.B. die sog. Floating Car Data (FCD) basieren auf dieser Art der Datenerfassung. Neben der fahrzeuginternen Geschwindigkeitsmessung erlauben optische oder Radarsensoren auch die Messung des Abstandes und der Relativgeschwindigkeit zu vorausfahrenden oder nachfolgenden Fahrzeugen, sodass nicht nur Reisezeiten und Fahrzeugtrajektorien sondern auch Spurwechsel, Überholvorgänge, der Treibstoffverbrauch und Emissionen erfasst werden können. Weiterer Vorteil der fahrzeugbezogenen Messungen ist, dass über die Gesamtdauer der Messung die konstanten fahrer- und fahrzeugtypspezifischen Abhängigkeiten direkt abgeleitet werden können. [SCHM10]

Aus dem betrachteten Wirkungsbereich sowie den zugrunde liegenden physikalischen Messprinzipien folgen unterschiedliche Fähigkeiten der verschiedenen Detektionssysteme. Je nach Fähigkeit ergibt sich eine gewisse Eignung für bestimmte Aufgabenstellun-

gen. Eine Übersicht hinsichtlich der Eignung der einzelnen stationären Detektoren für die Erfassung verschiedener Verkehrsarten sowie deren verkehrstechnische Anwendung befindet sich in Anlage B.

Eine pauschale Aussage über den generellen Einsatz eines bestimmten Gerätes ist jedoch nicht möglich. Welche Messtechnik die gestellte Aufgabe am besten erfüllt und letztendlich zum Einsatz kommt, variiert abhängig vom Verwendungszweck und der Aufgabe.

Aus der Vielzahl der technisch möglichen Erfassungseinrichtungen ergibt sich ein breites Spektrum von Einsatzgebieten. So findet die automatische Erfassung von Verkehrsdaten einerseits Verwendung bei Verkehrsuntersuchungen (Verkehrszählungen, -Statistiken, -Analysen, -Prognosen) und Verkehrsplanungen für inner- und außerörtliche Straßennetze, Straßenzüge und Knotenpunkte. Andererseits besitzen Verkehrsdetektoren aber auch eine besondere Relevanz im Kontext der Verkehrsbeeinflussung durch Netz-, Strecken- und Knotenpunkt-Beeinflussungsanlagen oder bei punktuell querschnittsbezogenen wirksamen Anlagen sowie bei Sonderanwendungen, wie z.B. Stauwarnanlagen, Fahrstreifen-signalisierung oder Anlagen zur Wechselwegweisung. Im Innerortsbereich finden sich Verkehrsdetektoren insbesondere im Zusammenhang mit der Steuerung verkehrsabhängiger Lichtsignalanlagen. [FGSV91], [BAUM08]

Verkehrsdetektoren haben innerhalb ihres Wirkungsbereiches die Aufgabe, Grundinformationen, wie z.B. Anwesenheit, Bewegungsverhalten, Größe und Art von Fahrzeugen etc., als Basis für die Bildung bekannter und gebräuchlicher Kenngrößen (z.B. Geschwindigkeit, Reisezeit) zur Beschreibung des Verkehrsgeschehens zu liefern. Neben den reinen Verkehrsdetektoren werden auch andere Detektoren eingesetzt, die zusätzlich Informationen aus der den Verkehr umgebenden Umwelt aufnehmen. Solche Umwelt-detektoren messen beispielsweise Temperatur, Feuchtigkeit, Sicht, Schadstoffgehalt und Lärm und liefern damit wichtige, unterstützende Hinweise zur Beeinflussung des Verkehrsgeschehens z.B. bei Tunnelsteuerungen oder für Nebelwarnanlagen. [FGSV91]

2.5 Qualitätsanforderungen

Der Begriff der Qualität sowie formulierte Qualitätskriterien, die Leistungen oder Produkte aufweisen müssen, um als qualitativ hochwertig angesehen zu werden, existieren in nahezu allen Bereichen. Auch im Bereich des Straßenverkehrswesens „[stützen sich] Planung, Ausführung, Betrieb und Unterhaltung von Straßen zunehmend auf Qualitätsmanagementsysteme“ [FSST04].

Die DIN- und ISO-Normen bilden eine einheitliche Grundlage für die Formulierung genauer Definitionen für Qualität und die dazugehörigen Begriffe. Laut der derzeit international gültigen DIN-EN-ISO-9000-Reihe „Qualitätsmanagementsysteme“ stellt Qualität den „Grad, in dem ein Satz inhärenter (dem System innewohnender) Merkmale Anforderungen erfüllt“ dar. Als Merkmal wird in diesem Zusammenhang eine kennzeichnende Eigenschaft verstanden. Anforderungen wiederum sind „Erfordernisse oder Erwartungen, die festgelegt, üblicherweise vorausgesetzt oder verpflichtend sind“. [EISO05]

Im Rahmen der Datenerhebung ist für das Qualitätsmanagement im Straßenverkehrswesen sowohl die qualitative Betrachtung der Daten als auch der Datenerfassung, d.h. der genutzten Verkehrsdetektoren, relevant.

Datenqualität

Die automatische Erfassung der vorliegenden Verkehrssituation mittels Detektoren liefert die notwendige Datenbasis für die Beschreibung und Bewertung des Verkehrsablaufs auf deren Grundlage der Verkehrsregelungsprozess, also der Eingriff in das Verkehrsgeschehen z.B. über direkte Beeinflussung oder Informationen, stattfindet. Von entscheidender Bedeutung ist hierbei, dass diese erhobene Datenbasis mittels ihrer Aussagefähigkeit und -genauigkeit in der Lage ist, das betrachtete Verkehrsgeschehen möglichst gut widerzuspiegeln. Voraussetzung für die Verwendbarkeit der Verkehrsdaten muss demnach deren eigene Qualität sein: „Die Qualität der Beeinflussung und der Information des Verkehrsteilnehmers ist in hohem Maße abhängig von der Qualität der erhobenen Verkehrsdaten“ [FGSV06].

Entsprechend der allgemeinen Definition des Qualitätsbegriffes müssen erhobene Verkehrsdaten, um als qualitativ hochwertig angesehen werden zu können, gewissen Anforderungen genügen: „Entscheidungen in der Verkehrs-, Stadt- und Umweltplanung, für betriebliche Maßnahmen und für das Straßenbestandsmanagement erfordern aussagekräftige und zuverlässige Verkehrsdaten.“ [FGSV10].

Im Rahmen eines Workshops zum Thema „Traffic Data Quality“ fasste [TURN02] verschiedene Ansätze für die Beurteilung der Datenqualität zusammen und entwickelte auf deren Basis Empfehlungen für geeignete Qualitätskriterien:

- **Genauigkeit** = Grad der Übereinstimmung zwischen den Daten und einem die Realität widerspiegelnden Bezugsdatensatz,
- **Vollständigkeit** (auch in Bezug auf Verfügbarkeit) = Grad der Abdeckung benötigter Kennwerte,
- **Zuverlässigkeit** = Grad der Konstanz hinsichtlich zeitlicher und räumlicher Erhebung der Daten,
- **Plausibilität** = Grad der Richtigkeit bzgl. der Realität (d.h. sind die Daten realistisch und stimmen mit Erfahrungen überein),
- **Aktualität** = Grad der zeitlichen Verfügbarkeit (d.h. liegen die Daten zeitnah bzw. rechtzeitig für die betrachtete Anwendung vor),
- **Zugänglichkeit** (bzw. Verwendbarkeit) = Grad des nötigen Aufwands für Einsicht und Weiterverarbeitung der Daten.

Darüber hinaus sei das Wissen über den Verwendungszweck nach [TURN02] für die Beurteilung der Qualität der Daten unabdingbar, da die Relevanz der verschiedenen Kriterien in Abhängigkeit von der späteren Anwendung variieren kann.

Neben den Qualitätskriterien nach [TURN02] existieren weitere Ansätze, die sich mit diesem Thema ebenfalls auseinandersetzen und teils gleiche oder zumindest ähnlich Inhalte aufweisen, jedoch ggf. anders strukturiert sind. So greift beispielsweise [FSST04] die Qualitätskriterien von [TURN02] auf, weitet jedoch den Begriff der Datenqualität in die drei Dimensionen „Thematik“, „Raum“ und „Zeit“ auf und gibt somit den Kriterien einen strukturelle Rahmen: „Die ‚Qualitätsdimensionen‘ lassen sich als Perspektiven begreifen, unter denen man den qualitätsmäßig zu bewertenden Gegenstand betrachtet. Je nach Perspektive ergeben sich dann verschiedene Qualitätsmerkmale, die sich in den jeweiligen Erscheinungsformen realisieren“. Die Qualitätsdimensionen mit entsprechender Zuordnung der Qualitätsmerkmale „Vollständigkeit/Umfang“, „Genauigkeit“ und „Zuverlässigkeit“ ist Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1: Qualitätsdimensionen nach [FSST 04]

Qualitätsdimensionen	Qualitätsmerkmal	Erscheinungsformen
Thematik	Umfang	<ul style="list-style-type: none"> - inhaltliche Vollständigkeit - thematische Genauigkeit (Attributgenauigkeit) - Konsistenz (Widerspruchsfreiheit) - Identifizierbarkeit - semantische Genauigkeit
Raum	Genauigkeit	<ul style="list-style-type: none"> - räumliche Vollständigkeit - Abstraktion / Auflösung - Lage- und Höhengenaugigkeit - Skalierbarkeit
Zeit	Zuverlässigkeit	<ul style="list-style-type: none"> - Herkunft der Daten (Produzent, Quelle, Bearbeitungsprozesse) - Aktualität - zeitliche Genauigkeit - Funktionalität - Zugreifbarkeit - Verfügbarkeit - Fortführbarkeit - Änderbarkeit - Übertragbarkeit - Anpassbarkeit - Portabilität - Effizienz

Qualität der Datenerfassung

Eng verbunden mit der Frage nach der Qualität der Verkehrsdaten ist die Frage nach der Qualität der Verkehrsdatenerfassung. Nur wenn die vorhandene Sensorik in der Lage ist, selbst qualitativ hochwertig zu arbeiten, d.h. die gestellten Anforderungen hinsichtlich

ihres Verwendungszweckes zu erfüllen, können qualitativ hochwertige Daten aus der Erfassung resultieren.

Nach [FGSV91] ergeben sich neben verkehrstechnischen Forderungen, die sich auf die Art und Weise der Datenerfassung beziehen, auch technische und betriebliche Anforderungen, die an Detektoren zu stellen sind. Eine zusammenfassende Übersicht über diese Einordnung sowie der sich daraus ergebenden Qualitätskriterien und ihrer Erscheinungsformen bietet die Tabelle, die in Anlage C eingesehen werden kann.

Auf die Inhalte der einzelnen Anforderungskategorien wird im Kapitel 4 eingegangen.

3 Grundlagen zur Funktechnik Bluetooth

Ziel dieser Arbeit soll es sein, den Einsatz der Bluetooth-Technologie mit seinen Möglichkeiten und Grenzen im Verkehrsbereich darzustellen. Dafür werden im folgenden Kapitel zunächst die Grundlagen zum allgemeinen Verständnis dieser Technologie gelegt. Ausgangspunkt dafür sind generelle Eigenschaften und Charakteristiken des gemäß IEEE 802.15.1 entwickelten Industriestandards sowie daran anschließend die Prinzipien der Informationsübertragung und die Darstellung erzielbarer Reichweiten. Darüber hinaus fließen auch vorliegende Einschränkungen und datenschutzrechtliche Aspekte in die Betrachtung ein.

3.1 Industriestandard

Bluetooth wurde mit der Intention entwickelt, ein kostengünstiges und energiesparendes Übertragungssystem zu erstellen, mit dessen Hilfe Daten zwischen nutzerbezogenen Endgeräten der IT/TK-Branche im Nahbereich ausgetauscht werden können ohne auf die Nutzung einer Kabelverbindung angewiesen zu sein. Erste Untersuchungen zur Machbarkeit einer preiswerten und im Stromverbrauch niedrigen Funkschnittstelle lieferte die Firma Ericsson Mobile Communications im Jahre 1994: „Das Ziel der Studie bestand darin, einen Weg zu finden, Kabelverbindungen zwischen Mobiltelefonen und PC-Karten, Headsets, Desktops und anderen Geräten überflüssig zu machen.“ [MULL01]

Eine konkrete Entwicklung erfolgte jedoch erst ab dem Jahr 1998 als sich die Firmen Ericsson, IBM, Intel, Nokia und Toshiba als sog. „Special Interest Group“ (SIG) zusammenschlossen. Später kamen dann auch Microsoft, Agere Systems, 3COM und Motorola als sog. Promoter Companies hinzu. Die SIG brachte schließlich unter dem Namen „Bluetooth“ einen Standard heraus, der einen Satz von Bluetooth-Spezifikationen festlegt. Diese Spezifikationen beinhalten die Beschreibung einer drahtlosen Schnittstelle mit deren Hilfe die Funkübertragung von Sprache und Daten über kurze Distanzen hinweg ermöglicht wird und somit unterschiedliche Geräte über einen beschlossenen Standard miteinander kommunizieren können. Die erste Spezifikation 1.0 wurde im Juli 1999 veröffentlicht. Die Marktreife der Bluetooth-Spezifikation konnte aufgrund einer Reihe von Fehlern und Ungenauigkeiten jedoch erst mit der Version 1.1, die seit dem 22. Februar 2001 vorliegt, hergestellt werden. Die Bluetooth-Spezifikation umfasst im Wesentlichen zwei Dokumente: Bluetooth Core Specifications (Beschreibung der Kommunikation, Protokolle und Technologie) und Bluetooth Profile Specifications (Spezifikation der Bluetooth-Profile, Darstellung von Anwendungsszenarien). Mittlerweile ist die Core Specification bereits in der Version 4.0 verfügbar (veröffentlicht am 30. Juni 2010). Sie enthält neben einer stark verkürzten Zeit, die zum Verbindungsaufbau benötigt wird, auch die Aufrechterhaltung der Verbindung zwischen zwei Geräten bis zu einer Entfernung von 100 Metern. [BLUE11], [GESS09]

Das IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) hat mit dem Projekt 802.15 WPAN Task Group 1 (IEEE 802.15.1) aus der Bluetooth-Spezifikation v1.1 einen Wireless

Personal Area Standard abgeleitet, womit Bluetooth den Status eines IEEE-Standards erhielt. Die IEEE-Projekte 802 beschäftigen sich mit Standards im Bereich der lokalen Netze (LAN) und legen Netzwerkstandards auf den Schichten 1 und 2 (Bitübertragungs- und Sicherungsschicht) des OSI-Schichtenmodells fest (siehe dazu Abschnitt 3.2). Das Projekt 802.15 ist in diesem Zusammenhang ein Sonderfall und befasst sich speziell mit den sog. Wireless Personal Area Networks (WPAN). WPAN bezeichnet Kurzstrecken-Funktechnik, deren Ziel die Überbrückung kurzer Distanzen auf Funkbasis unter Vermeidung verlegter Kabelverbindungen darstellt. Unter kurzen Distanzen werden Reichweiten zwischen 0,2 und 50 Metern verstanden, sodass nur das unmittelbare Umfeld (d.h. der „persönliche“ Bereich – daher auch Personal Area Network) des Senders abgedeckt wird. [BSIG11], [BNUT03]

Bluetooth wurde als offener Industriestandard konzipiert und ist dementsprechend kostenlos und ohne Registrierung über das Internet beziehbar, sodass mittlerweile eine weite Verbreitung der Technologie erreicht wurde. Heutzutage gibt es kaum noch Mobiltelefone, die nicht mit Bluetooth ausgestattet sind – auch in Notebooks, Headsets, PC-Peripheriegeräten (z.B. Computer-Maus, Drucker), Autoradios und in Navigationsgeräten sind Bluetooth-Chips enthalten. Aufgrund ihrer inzwischen sehr geringen physikalischen Größe ergibt sich eine große Bandbreite an Einsatzmöglichkeiten. [MULL01]

3.2 Bluetooth-Protokollstapel und -Profile

Die Bluetooth-Spezifikation fokussiert insbesondere die Herstellung der Kommunikation zwischen verschiedenen Geräten unterschiedlicher Hersteller. Dafür wurde in Anlehnung an das OSI-Referenzmodell eine segmentierte Protokoll-Architektur entworfen. Protokolle stellen eine gemeinsame, formale Vereinbarung über die Art und Weise des Informationsaustauschs zwischen Geräten dar. Mit diesen Protokollen wird exakt definiert, in welcher Art und Weise der Datenverkehr über die entsprechende Verbindung geleitet wird. In diesem Zusammenhang spielt insbesondere die Formatierung der Nachrichten eine wesentliche Rolle, d.h. Protokolle definieren, welche Teile der Nachricht Adressen, Fehlerkontrollen oder Nutzdaten vorbehalten sind. [MULL01]

Allgemein akzeptierte Protokolle bilden eine entscheidende Grundlage für die Funktionsfähigkeit eines Netzwerkes. Erst wenn die unterschiedlichen Hard- und Softwarehersteller ein gemeinsames Protokoll akzeptieren, sind die Geräte der verschiedenen Hersteller in der Lage miteinander zu kommunizieren und so ein Netzwerk aufzubauen. In den 70er Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts übernahmen daher internationale Standardisierungsorganisationen die Entwicklung eines allgemeinen Referenzmodells – das sog. OSI- (Open Systems Interconnection) Referenzmodell. Dieses Modell bildet eine Grundlage zur Visualisierung des Kommunikationsprozesses und der Möglichkeiten der wechselseitigen Kooperation. Das OSI-Referenzmodell stellt den Kommunikationsprozess in einer geschichteten Struktur dar, in der gewisse Kommunikationsabläufe als einzelne Segmente verstanden werden. Die Separierung der einzelnen Netzwerkfunktionen soll den fehlerfreien Ablauf des Informationsaustauschs zwischen den angeschlossenen, unter-

schiedlichen Geräten gewährleisten und so die Kooperation zwischen den Produkten der verschiedenen Hersteller unterstützen. Der allgemeine Aufbau des sieben-schichtigen OSI-Modells ist in Anlage D dargestellt und erläutert. [MULL01]

Auch die Bluetooth-Technologie wurde bei der Entwicklung ihrer Architektur durch das OSI-Referenzmodell beeinflusst. So umfasst die Bluetooth-Spezifikation einen Software-Protokollstapel bestehend aus verschiedenen Schichten, der es den Applikationen ermöglicht, andere Bluetooth-Geräte und Services zu finden und zu nutzen. Abbildung 3 verdeutlicht das Bluetooth-Schichtenmodell anhand der Gegenüberstellung mit dem OSI-Referenzmodell. [GESS09]

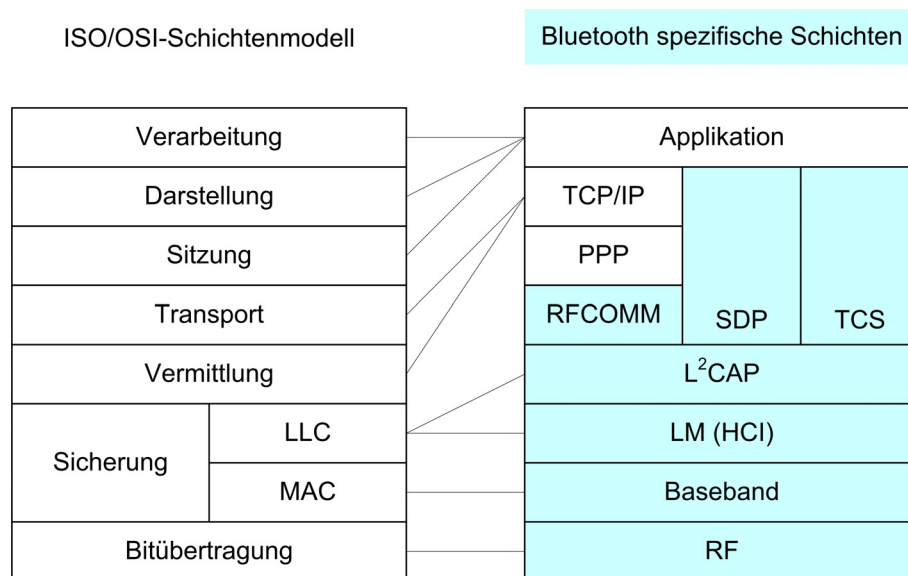


Abbildung 3: Gegenüberstellung der Bluetooth-Schichten zum OSI-Modell unter Verwendung von [GESS09]

Die Kernspezifikation (Core Specification) von Bluetooth beschreibt die Protokolle von der Bitübertragungsschicht bis zur Sicherungsschicht entsprechend des Schichtenansatzes des OSI-Modells. Wie bereits in Abschnitt 3.1 erläutert sind diese beiden Schichten des Bluetooth-Protokollstapels durch das IEEE Projekt 802.15 standardisiert.

Die Bitübertragungsschicht wird auch als physikalische Schicht bezeichnet und bildet die Funktechnik ab - im Fall der drahtlosen Bluetooth-Technik handelt es sich hierbei um die Luftschnittstelle, weswegen die unterste Schicht namentlich auch als Bluetooth Radio oder Radio Frequency (RF) in der Literatur zu finden ist. Die Bluetooth-Radio-Schicht stellt alle notwendigen Funktionen für die physikalische Realisierung der Funkübertragung (wie z.B. Frequenzsprungverfahren und Time Division Duplexing) zur Verfügung. Darüber hinaus sind hier auch die genutzten Frequenzen, Modulationen und Sendeleistungen spezifiziert. [BNUT03]

Die Sicherungsschicht des OSI-Modells wird im Bluetooth-Schichtenmodell mit dem sog. Basisband (Baseband) verkörpert. Im Basisband sind die Mechanismen zum Verbin-

dungsaufbau, die Rahmenstruktur (Paketformate) sowie das Zeitverhalten spezifiziert. Dafür verwaltet das Basisband die physischen Kanäle und Verbindungen und ist für die Fehlerkorrektur und Festlegung der Sprungfolge des Piconetzes verantwortlich. Das Basisband steuert somit den Radioteil und bereitet die Daten für die höheren Schichten auf. [HOLT03]

Die nächste Schicht dient der Verbindungsverwaltung und -steuerung (Link Manager Protokoll; LMP). Der Link Manager steuert den Verbindungsaufbau und die –verwaltung zwischen zwei Geräten und enthält zudem Sicherheits- und Authentifizierungsfunktionen (z.B. Schlüsselidentifikation und –generierung für Verschlüsselungen). Darüber hinaus kontrolliert der Link Manager die Energiesparmodi, Betriebszyklen und den Verbindungsstatus der Bluetooth-Einheit im Piconetz. [BNUT03]

Das L2CAP (Logical Link Control and Adaptation Protocol) ist ebenfalls ein Protokoll der Sicherungsschicht. Es passt die darüber liegenden Schichten an die Fähigkeiten des Basisbandes an und spezifiziert die Übertragungsdetails (verbindungslos und verbindungsorientiert). [HOLT03]

Die weiteren Schichten stellen eine Mischung verschiedener Protokolle dar und dienen beispielsweise der Dienstfindung (Service Discovery Protocol; SDP), d.h. der Erkennung und Suche von Diensten mit bestimmten Eigenschaften in Reichweite eines Bluetooth-Gerätes. Auch die Emulierung serieller Schnittstellen, wie sie für den Anschluss von Peripheriegeräten (Tastatur, Maus etc.) benötigt werden, ist mittels des Protokolls RFCOMM (Radio Frequency Communication) möglich. Die Steuerung von Telefon- und Telefoniefunktionen wird wiederum mit TCS BIN (Telephony Control Protocol Specification – Binary), das telefonrelevante Signalisierungsfunktionen für einen Verbindungsaufbau für Sprache und Daten übernimmt, realisiert. [BNUT03]

Die oberhalb von RFCOMM liegenden Protokollschichten Point-to-Point-Protokoll (PPP) und Internetprotokoll (TCP/IP) wurden nur exemplarisch in die Abbildung aufgenommen. An dieser Stelle soll auf diese jedoch nicht näher eingegangen werden, da es sich hierbei um keine Bluetooth-Spezifikationen handelt.

Zusammengefasst definieren die einzelnen Schichten des Bluetooth-Protokollstapels die exakten technischen Spezifikationen, die die einzelnen Komponenten eines Bluetooth-Moduls bei einer Implementierung zur Erfüllung vorausgesetzter Eigenschaften aufweisen müssen. [BNUT03]

Das letztendliche Ziel der Bluetooth-Spezifikation besteht darin, die Entwicklung von Anwendungen zu unterstützen, die im Rahmen dieser Spezifikation zusammenarbeiten können. Um nun die Zusammenarbeit von Bluetooth fähigen Geräten unterschiedlicher Hersteller zu garantieren, ist deren Interoperabilität entscheidend: „Eine Interoperabilität wird erreicht, wenn die Anwendungen der Netzwerkgeräte mit identischen Protokollen arbeiten können, wobei verschiedene Anwendungen auch verschiedene Proto-

kollstacks [Protokollstapel] verwenden können“ [MULL01]. Das bedeutet, dass nicht alle Anwendungen Gebrauch von sämtlichen Protokollen des Bluetooth-Protokollstapels machen, sondern sich nur bestimmter Dienste bedienen, die gerade zur Unterstützung der jeweiligen Hauptanwendung erforderlich sind. Jedes Bluetooth-Gerät nutzt entsprechend seiner Hauptanwendung also nur eine Untermenge der insgesamt verfügbaren Protokolle. Die grundlegende Anwendung eines Bluetooth-Gerätes, d.h. dessen Einsatzmodell, und in Folge dessen auch die genutzten Protokolle werden definiert über sog. Profile. Die Profile beschreiben, welche Protokolle und Funktionen vorhanden sein müssen, damit ein Gerät ein Einsatzmodell erfüllt. Ein Profil entspricht damit einer Art Standardlösung für ein bestimmtes Nutzungsszenario eines Bluetooth-Gerätes. Der Zusammenhang zwischen Profilen und Protokollen kann schematisch über vertikale Schnitte durch den Protokollstapel verdeutlicht werden. Von den als horizontale Balken gekennzeichneten Protokollen wird je Profil (vertikale Balken) nur eine gewisse Auswahl genutzt. Mit einem Profil wird somit für jede Anwendung ein eigener Protokollstapel bereitgestellt (siehe Abbildung 4). [BNUT03], [MULL01]

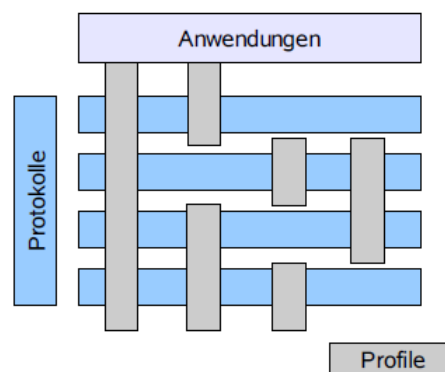


Abbildung 4: Zusammenhang zwischen Protokollen und Profilen [HOLT03]

Die verschiedenen vorhandenen Bluetooth-Profile sind in der Profilspezifikation (Profile Specification) der Bluetooth-Spezifikation enthalten.

3.3 Bluetooth-Topologie

Die Topologie eines Netzwerkes beschreibt die Struktur der Übertragungswege zwischen den Knoten eines Netzes und entspricht somit dessen räumlicher Ausdehnung. Die räumliche Struktur eines Netzwerkes ergibt sich aus der Verbindung zweier Knoten (Geräte) und ist abhängig von Kosten, Zuverlässigkeit und der Anzahl der benötigten Verbindungen. Bei drahtlosen Netzwerken unterscheidet man zwischen den Verbindungsarten: [TOPO11]

- Punkt-zu-Punkt: direkte Verbindung zwischen zwei Knoten,
- Punkt-zu-Mehrpunkt: Verbindung einer Zentrale mit mehreren Außenstellen
 - o Sternnetz: ein übergeordneter zentraler Knoten ist mit allen Knoten verbunden,

- Baumnetz: das Netz besitzt einen zentralen Ursprung – die vom Ursprung abgehenden Knoten sind jedoch selbst wieder Ausgangspunkte für weitere Verzweigungen,
- Maschennetz: jeder Knoten ist mit einem oder mehreren anderen Knoten verbunden (Sonderformen: Ringnetz bei dem jeder Knoten mit genau zwei anderen Knoten verbunden ist, sodass ein geschlossener Ring entsteht oder auch vollständig vermaschtes Netz, in dem jeder Knoten mit jedem anderen verbunden ist).

Die Bluetooth-Technologie erlaubt sowohl Punkt-zu-Punkt- als auch Punkt-zu-Mehrpunkt-Verbindungen. Der zentrale, übergeordnete Knoten wird im Fall von Bluetooth als sog. Master bezeichnet. Die Aufgabe des Masters bezieht sich auf die Administration des Netzes, d.h. er synchronisiert alle anderen Geräte (Slaves) im Netzwerk mittels seiner Takt- und Sprungsequenz und leitet das sog. Rufverfahren (Paging) zur Herstellung von Verbindungen ein. Der Master kann mit bis zu sieben anderen Geräten verbunden sein. Master und Slaves bilden zusammen ein Piconetz, das einen Verbund aus maximal acht gleichzeitig aktiven Geräten darstellt, wobei innerhalb dieses Netzes immer nur ein einziges Gerät der Master sein kann und die restlichen Geräte somit automatisch Slaves sind. Die Rollen von Master und Slave können jedoch auch während der Kommunikation getauscht werden. Darüber hinaus ermöglicht die Piconetz-Struktur die Einbuchung weiterer Geräte im sog. Parkmodus. Hierbei können sich zusätzlich bis zu 255 Slaves mit dem Master synchronisieren. Eine aktive Teilnahme am Netzwerk ist jedoch nicht möglich – solange der Master die geparkten Slaves nicht aktiviert, können sie keine Daten senden. [GESS09]

Die Unterstützung von Punkt-zu-Mehrpunkt-Verbindungen durch die Bluetooth-Spezifikation ermöglicht die Einrichtung mehrerer zusammenhängender Piconetze. Solch eine multiple Pico-Netzstruktur wird als Scatternet bezeichnet. Zwei Piconetze können hierbei z.B. mittels eines gemeinsamen Slaves miteinander kommunizieren. Abbildung 5 verdeutlicht die verschiedenen Topologien vernetzter Bluetooth-Geräte. [MULL01]

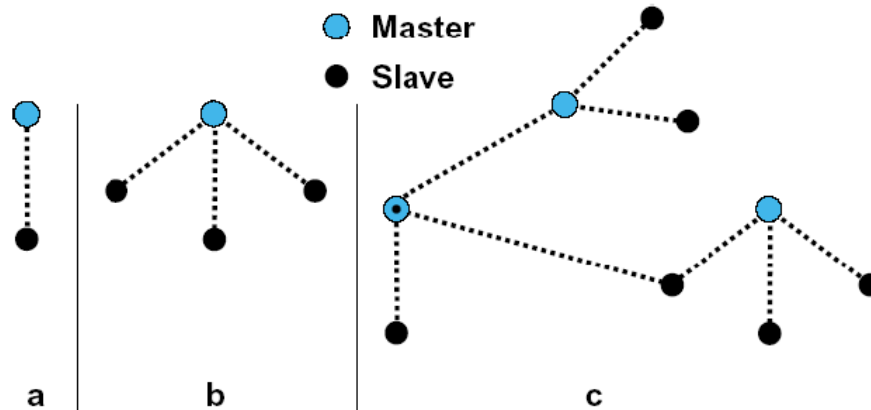


Abbildung 5: Piconetze mit (a) einem Master und einem Slave, (b) einem Master und mehreren Slaves sowie (c) ein Scatternetz, bestehend aus drei Piconetzen [BSPE09]

Bluetooth unterstützt darüber hinaus sog. „Ad-hoc-Netzwerke“. Ein Gerät, das mit der Bluetooth-Spezifikation ausgestattet ist, kann demnach mit anderen, gleichartig ausgestatteten Geräten eine sofortige Verbindung herstellen sobald sich diese in Reichweite befinden. Zwei Geräte können somit ohne sich bislang zu kennen und ohne vorhandene Infrastruktur, selbstständig ein Netzwerk bilden, das sich automatisch konfiguriert. Dafür wird die in jedem Gerät verfügbare eindeutige MAC- (Media Access Control) Adresse, die entsprechend des IEEE 802 Standards für LANs definiert ist, zur Identifikation eines Gerätes verwendet. Das Gerät, das die Kommunikation initiiert hat, übernimmt die Rolle des Masters.

3.4 Bluetooth-Technologie

Bluetooth arbeitet im weltweit verfügbaren, lizenzfreien 2,4 GHz ISM- (Industrial-, Scientific-, Medical-) Band, das den Frequenzbereich zwischen 2,400 und 2,4835 GHz nutzt, wobei sich am unteren Ende ein 2,0 MHz und am oberen Ende ein 3,5 MHz breites Guard- (Schutz-) Band zur Vermeidung von Interferenzen befindet. Die Übertragung innerhalb dieses Frequenzbandes ist gebührenfrei und in den meisten Staaten der Welt ohne Auflagen möglich (Ausnahme: gewisse Einschränkungen z.B. in Frankreich und Spanien), wodurch das ISM-Band insbesondere für Geräte aus Industrie, Wissenschaft und Medizin mit kleinen Sendeleistungen von Vorteil ist. Die Vorteile, die sich aus der Verwendung des ISM-Bandes ergeben, implizieren jedoch gleichzeitig gewisse Nachteile. So arbeiten auch andere Geräte in diesem Frequenzbereich, wie z.B. WLAN und Schnurlos-telefone oder auch Mikrowellenherde in der Küche, Garagentüröffner und Autozentralverriegelungen. Demzufolge kann es zu gegenseitigen Wechselwirkungen zwischen den Geräten kommen, sodass ein störungsfreier Betrieb nicht automatisch gewährleistet werden kann. [GESS09]

Um wechselseitige Störungen möglichst gering zu halten bzw. auszuschließen und damit eine gleichmäßige Nutzung der Bänder zu realisieren, werden bei Geräten, die im ISM-Band arbeiten, Frequenzsprungverfahren eingesetzt. Dafür wird das zur Verfügung ste-

hende Frequenzband in 79 gleiche Kanäle mit jeweils einer Bandbreite von 1 MHz aufgeteilt. Für nationale Beschränkungen wie in Frankreich existiert auch eine Festlegung für 23 schmalere Bänder, da der dort verfügbare Frequenzbereich lediglich zwischen 2,4465 und 2,4835 GHz liegt. Um das Band homogen auszulasten, wechselt der Sender permanent zwischen den Frequenzen und ändert so in kurzen Abständen permanent seine Sendefrequenz (siehe Abbildung 6). Synchron dazu erfolgt eine Abstimmung der Empfangsfrequenz auf Seiten des Empfängers. Die Frequenzwechselfolgen (Hop-Muster / Hop-Sequenz) werden über einen vorher vereinbarten pseudo-zufälligen Code bestimmt. Um die so übertragenen Daten erkennen zu können, muss der gewählte Empfänger das Hop-Muster sowie die Umschaltzeitpunkte des Senders nachvollziehen können und somit Kenntnis davon besitzen. Voraussetzung für den Betrieb ist daher eine einwandfreie Synchronisierung von Sender und Empfänger.

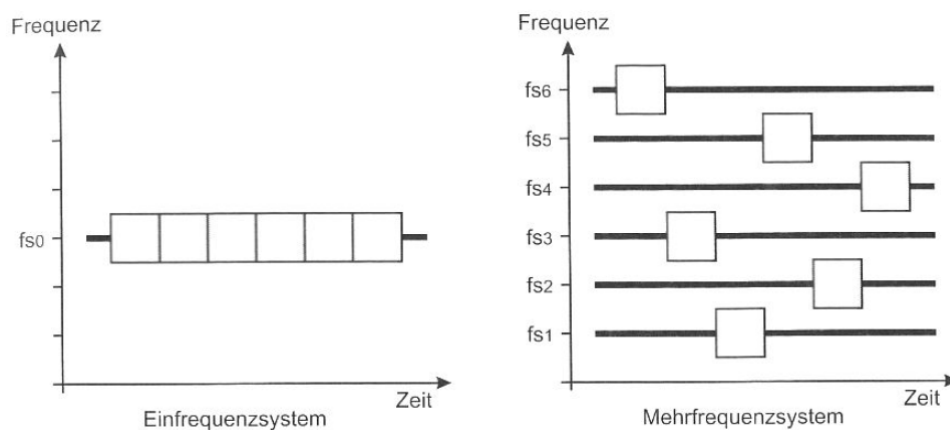


Abbildung 6: Prinzip Frequenzsprungverfahren [GESS09]

Durch die ständigen Frequenzwechsel wird letztendlich ein größeres Frequenzband für die Übertragung benötigt, sodass der Frequenzsprung zu einer Quasi-Spreizung der ursprünglich genutzten Bandbreite führt. Das Frequenzsprungverfahren ordnet sich somit in die Kategorie der Frequenzspreiz-Verfahren (auch „Spread-Spectrum“-Technik genannt) ein. Abbildung 7 verdeutlicht das Spread-Spectrum-Prinzip. In Anlage E findet sich zudem eine Übersicht des Bezugsbereichs dieses Prinzips im Zusammenhang mit der Aufbereitung des hochfrequenten Sendesignals.

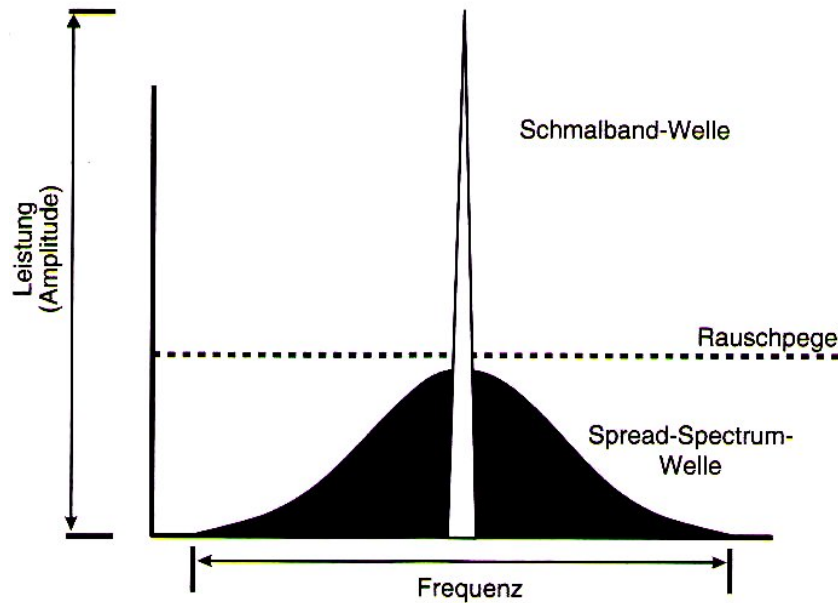


Abbildung 7: Prinzip von Spread-Spectrum [GESS09]

Für die Übermittlung stehen unterschiedliche Verfahren zur Aufteilung des verfügbaren Spektrums zur Verfügung, um einen geregelten Zugriff bei der Zuordnung von Zeitschlitzen für das Senden und Empfangen zu gewährleisten. Bei Bluetooth kommt das sog. TDD- (Time Division Duplex) Verfahren zum Einsatz bei dem zum Senden und Empfangen von Daten ein einziger Kanal zur Verfügung steht. Durch den in fester Reihenfolge stattfindenden Wechsel der Übertragungsrichtung ist die zeitlich versetzte Nutzung dieses Kanals als Hin- und Rückkanal möglich (siehe Abbildung 8).

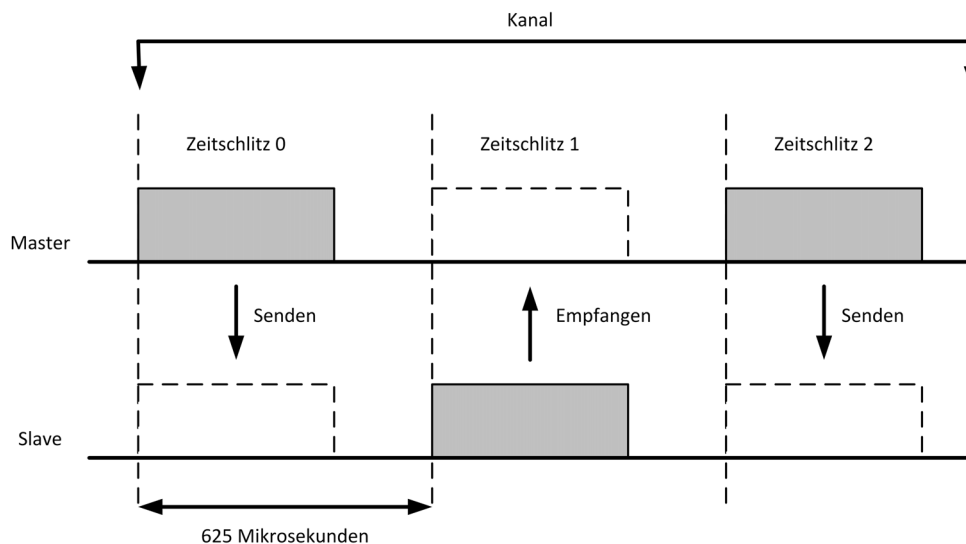


Abbildung 8: Frequenzsprung-/Zeitduplexverfahren (Frequency Hopping Spread Spectrum) [BSPE09]

Aus den aufeinanderfolgenden Sende- und Antwort-Zeitschlitzen, die jeweils eine Dauer von $t_{\text{slot}} = 625 \mu\text{s}$ besitzen, ergibt sich eine Sprungfrequenz (Hop-Rate) von 1600 Sprüngen je Sekunde (Einheit in Hops/s). „Der Vorgang des Wechsels zwischen Senden und

Empfangen geschieht [...] so außerordentlich schnell, dass der Endnutzer keinerlei Lücken oder Verzögerungen wahrnehmen kann. Dem Endnutzer erscheint dieses Verfahren als eine echte Vollduplex-Verbindung.“ [MULL01]

Vollduplex bezeichnet die Eigenschaft eines Gerätes, Daten zur selben Zeit zu senden und zu empfangen. Die Trennung zwischen Senden und Empfangen wird demnach im Zeitbereich erreicht – die zugewiesene Bandbreite bleibt darüber hinaus in jeder Richtung flexibel, sodass mit unterschiedlichen Trägerfrequenzen entsprechend des oben beschriebenen Frequenzsprung-Verfahrens übertragen werden kann. [MULL01]

Der Vorteil, der sich aus der Verwendung des Frequency-Hopping-Spread-Spectrum-(FHSS) Verfahrens sowie dem Zugriff per Time Division Duplexing ergibt, bezieht sich insbesondere auf die geringere Störanfälligkeit gegenüber zufälligen, aber auch gezielten Störungen: „Da die Signalleistung über eine größere Bandbreite gespreizt ist, ergibt sich als Resultat ein robusteres Signal, welches weniger anfällig gegenüber Störungen und anderen Beeinträchtigungen durch Überlagerung ist“ [MULL01]. So erschwert der ständige Wechsel der Übertragungsfrequenz eine gezielte Störung unter der Voraussetzung, dass die Folge der Frequenzwechsel einem potentiellen Störer vorher nicht bekannt ist. Darüber hinaus ermöglicht der schnelle Frequenzwechsel die Verringerung der Auswirkungen von Fading-Effekten. Bei der Funk-Kommunikation (sowohl im Nah- und Fernbereich) können Reflexionen an elektrisch leitenden Objekten (z.B. an Metallflächen im Nahbereich oder im Fernbereich an den verschiedenen Schichten der Ionosphäre) in der Umgebung der Sende- und Empfangseinrichtungen eintreten – in der Folge kann es zum Mehrfachempfang, im Extremfall auch zu Signalverdopplungen und sogar Signalauslösungen kommen. Der dabei auftretende Schwund des Signals wird als Fading bezeichnet. Da eine Auslöschung zu einer Zeit immer nur auf einer Frequenz bzw. einem Kanal auftritt und sich beim Frequenzsprung die benutzten Kanäle fortwährend ändern, ist der Datenverlust bei einer Signallöschung nur auf die Information beschränkt, die während der Nutzung des gestörten Kanals ausgesandt wurde. Ein weiterer Aspekt ist die durch das Frequenzsprungverfahren gesteigerte Abhörsicherheit: „Nur wenn der Mithörer die Sprungfolge [des Senders] kennt, ist ein Mithören ohne weiteres möglich“ [GESS09]. Ein weiterer Vorteil, der sich aus der Nutzung des Frequenzsprungverfahrens ergibt, ist der gleichzeitige Betrieb mehrerer Piconetze im selben räumlichen Überdeckungsbereich – die Wahrscheinlichkeit, dass es zu Kollisionen in der Datenübertragung während der Kommunikation zwischen Geräten aufgrund derselben genutzten Frequenz kommt, ist äußerst gering, sodass sich de facto der durchschnittliche Gesamtdurchsatz erhöht. [BNUT03]

Bei den FHSS-Verfahren wird zur Darstellung der Informationen die Frequenzmodulation angewendet. Als Modulationsverfahren setzt Bluetooth eine spezielle Variante der Frequenzumtastung (Frequency Shift Keying; FSK) ein, die die Frequenz der elektromagnetischen Wellen verändert. Im Gegensatz zum reinen FSK wird bei Bluetooth zusätzlich ein Gauß'scher Tiefpassfilter hinzugefügt, der das binäre (Rechteck-)Signal mittels Tiefpass-

filter mit gaußkurven-förmiger Filtercharakteristik filtert bevor es dem Frequenzmodulator zugeführt wird. Aus dieser Vorbehandlung des Signals ergeben sich schließlich weichere Übergänge zwischen den einzelnen Bits und somit eine Reduktion der Bandbreite gegenüber dem normalen FSK. Die Frequenzumtastung wird in diesem Fall als GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying) bezeichnet. Bei Bluetooth kommt speziell die sog. 2GFSK-Modulation (2-Level GFSK) zur Anwendung, d.h. es existieren 2 Zustände für die Änderung der Frequenz zur Informationsdarstellung. Praktisch wird hierbei eine binäre „1“ als positive und eine binäre „0“ als negative Frequenzabweichung (115 KHz) der Trägerfrequenz übertragen. Die 2GFSK-Modulation stellt eine Bruttodatenrate von 1 MBit/s bereit: „Die Datenrate von 1 MBit/s wird erzielt, da pro Zeiteinheit eine Information von 1 Bit dargestellt werden kann und Bluetooth mit einer Symbolrate von 1 MSymbol/s arbeitet.“ Die Nettodatenrate ist wiederum bei Bluetooth jedoch vom Format der verwendeten Pakete und vom Übertragungsverfahren abhängig. Der Vorteil der GFSK-Modulation liegt vor allem in der relativen Unempfindlichkeit gegenüber Rauscheinflüssen, da diese nicht die Frequenz der elektromagnetischen Wellen sondern deren Amplitude beeinflussen. [BLUE06]

Seit der Bluetooth-Spezifikations-Version 2.0 steht auch EDR (Enhanced Data Rate) zur Verfügung. EDR impliziert 2 verschiedene Modulationsverfahren: $\pi/4$ -QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying) und 8-DPSK (Digital Phase-Shift Keying), die die Daten dichter auf der Funkwelle verteilen. Je nach Modus können damit Bruttodatenraten von bis zu 2 bzw. 3 MBit/s erreicht werden. Als Nettodatenraten ergeben sich 1446,2 respektive 2169,6 kBit/s. Bluetooth-Geräte mit herkömmlicher GFSK-Modulation sind dennoch zu Geräten mit EDR kompatibel – wesentliche Bestandteile der gesendeten Informationen, wie der Zugangscode und der Paketkopf (siehe dazu Abschnitt 3.5) werden weiterhin per GFSK übertragen, sodass das Erkennen von Daten auf der Empfängerseite trotz unterschiedlicher genutzter Modulationsverfahren weiterhin gewährleistet ist. EDR wird zudem nur in Abhängigkeit des gegebenen Funkstörpegels verwendet, d.h. dass Bluetooth-Geräte selbst wenn sie EDR beherrschen Daten nicht unbedingt mit 2 oder 3 MBit/s übertragen. Da die Verdichtung der Daten auf der Funkwelle zu einer erschwerten Demodulation auf Seiten des Empfängers führt, erhöht sich die Anfälligkeit gegenüber Störungen. Nur wenn das Frequenzspektrum weitgehend störungsfrei und die Geräte möglichst nahe beieinander liegen, ist die Verwendung von EDR sinnvoll. [BLUE06]

3.5 Informationsübertragung

Für die Informationsübertragung bietet Bluetooth zwei Arten physikalischer Verbindungstypen (Links), die zwischen dem Master und einem Slave aufgebaut werden können:

- **SCO** (Synchronous Connection Oriented Link): synchrone verbindungsorientierte Übertragung,

- **ACL** (Asynchronous Connection Less Link): asynchrone verbindungslose Übertragung.

Asynchrone verbindungslose Übertragungen unterstützen symmetrische oder asymmetrische paketvermittelte Punkt-zu-Punkt-Verbindungen, wohingegen synchrone verbindungsorientierte Übertragungen symmetrische leitungsvermittelte Punkt-zu-Punkt-Verbindungen bieten. Bei der Leitungsvermittlung wird zur Abwicklung einer Sprach- oder Datenübertragung zwischen den Endpunkten einer Verbindung ein Pfad aufgebaut, der ausschließlich für diese Verbindung reserviert ist und auch nur für die Dauer derselben aufrechterhalten wird. Nach dem Ende der Übertragung wird der Pfad entsprechend abgebaut und die Ressourcen stehen erneut zum Aufbau einer anderen Verbindung zur Verfügung. Bei der Paketvermittlung hingegen werden die Daten in der Form individuell adressierter Pakete über mehrere gemeinsam genutzte Pfade zum Endpunkt übertragen. Ein Verbindungsaufbau und -abbruch existiert hier nicht, da die benutzten Pfade dauerhaft zur Verfügung stehen. Leitungs- und Paketvermittlung sind sowohl für drahtgebundene als auch drahtlose Netze geeignet und werden gleichermaßen für Sprache und Daten verwendet. Während die Paketvermittlung bei der Datenübertragung effizienter ist, arbeitet die Leitungsvermittlung bei Sprache effektiv. Für die Übertragung von Sprache sind die Anforderung und der Aufbau einer Verbindung zu einem anderen Gerät erforderlich, wohingegen für die Datenübertragung keinerlei Verbindungen über das Netzwerk hergestellt werden müssen, da die individuell adressierten Pakete gleichzeitig mit anderen Paketen übertragen werden. Die Übertragung zur gleichen Zeit impliziert jedoch eine gewisse Verzögerung beim Transport, sodass für Kommunikationsverbindungen mit Echtzeitübertragung von Sprache und Daten leitungsvermittelte Netze vorzuziehen sind. „Das Bluetooth-Basisbandprotokoll kombiniert leitungs- und paketvermittelte Dienste und ist damit gleichermaßen für Sprache und Daten geeignet“ [MULL01].

Bluetooth verwendet für die Leitungs- und Paketvermittlung Zeitfenster. Für die leitungsvermittelte Übertragung von Sprache werden drei Zeitfenster reserviert in denen simultan Pakete symmetrisch in beiden Richtungen versandt werden können. Es existieren maximal drei dieser synchronen Sprachkanäle mit einem Datendurchsatz von jeweils 64kBit/s in beiden Richtungen. Für die Datenübertragung mittels Paketvermittlung wird ein asynchroner Datenkanal angeboten, der symmetrische und asymmetrische paketvermittelte Punkt-zu-Punkt-Verbindungen unterstützt. Bei symmetrischer Übertragung können maximal 433,9 kBit/s in beide Richtungen übertragen werden, bei asymmetrischem Versand können maximal 723,2 kBit/s in die eine Richtung und 57,6 kBit/s in die andere Richtung erreicht werden. [BNUT03]

Die Übertragung von Daten und Sprache erfolgt in digitalen Systemen üblicherweise in Form von Datenpaketen. Diese Datenpakete stellen Dateneinheiten dar, die über eine Kommunikationsverbindung zwischen verschiedenen Geräten ausgetauscht werden. Sie bestehen zum Einen aus Nutzerdaten und zum Anderen aus für die Übertragung wichtigen Zusatzinformationen wie die Adressen des Senders und Empfängers sowie Synchro-

nisations- und Sicherheitsinformationen. Der formale Aufbau eines Bluetooth-Datenpakets besteht aus den Komponenten:

- Zugangscode (Länge 72 Bit),
- Kopf (Länge 54 Bit),
- Nutzdaten (Länge 0 bis 2745 Bit).

Ein Datenpaket kann lediglich aus dem Zugangscode bestehen, aus dem Zugangscode und dem Paketkopf oder auch aus dem Zugangscode, dem Paketkopf und den Nutzdaten.

Der Zugangscode, der den Beginn des Datenpaketes darstellt, wird zur Synchronisation und Identifikation eines Piconetzes genutzt. Die zu einem Piconetz zugehörigen Datenpakete können so mittels des Zugangscode eindeutig identifiziert werden. Der Zugangscode selbst besteht aus einer 4 Bit großen Präambel, einem 64 Bit großen Synchronisationsfeld und sofern ein Paketkopf (Header) folgt, einem 4 Bit großen Anhang (Trailer), so dass sich die Gesamtlänge des Zugangscode auf 72 Bit (bzw. falls kein Header folgt nur 68 Bit) beläuft. Die Präambel unterrichtet den Empfänger über die Ankunft eines Paketes, das Synchronisationsfeld liefert die Synchronisationsinformationen und das Timing mit dem Empfänger. Der Trailer zeigt an, ob weitere Informationen in Form des Headers folgen. Abbildung 9 verdeutlicht den schematischen Aufbau des allgemeinen Bluetooth-Paketformats mit Aufschlüsselung der Bestandteile des Zugangscode und des Paketkopfes [MULL01]:

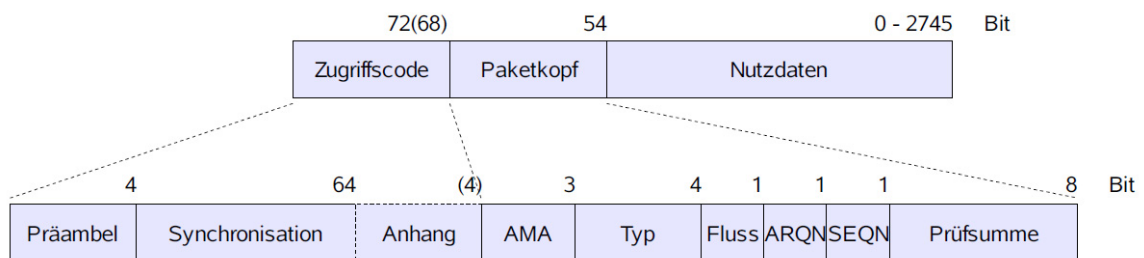


Abbildung 9: Bluetooth-Paket-Format mit Zugangscodeaufschlüsselung [HOLT03]

Es existieren drei verschiedene Zugangscodetypen:

- Channel Access Code (CAC): Datenübertragung,
- Device Access Code (DAC): Geräte-Ruf (Paging),
- Inquiry Access Code (IAC): Geräte-Erkennung.

Der CAC dient der Identifikation eines Piconetzes bei der Datenübertragung und ist in allen Paketen enthalten, die in einem Piconetz ausgetauscht werden. Demzufolge beginnen alle Pakete, die im selben Piconetz versendet werden, mit dem demselben CAC. Der

DAC wird bei Signalisierungsverfahren, wie z.B. beim sog. Paging (Geräteruf), zur Übertragung bestimmter Kennungen genutzt. Das Ziel ist hierbei durch den Versand einer Reihe von Nachrichten, eine Kommunikationsverbindung mit einer in Reichweite befindlichen, aktiven Einheit aufzubauen. Die Beantwortung des Geräterufs erfolgt ebenfalls unter Nutzung des DAC. Der IAC wird demgegenüber zur reinen Erkennung anderer Geräte in Reichweite verwendet. [HOLT03]

Dem Zugangscode kann wie vorher beschrieben ein Paketkopf folgen, der Informationen über die Leitungssteuerung (Link Control; LC) enthält. Der Header ist aus sechs Feldern aufgebaut, deren Längen zusammen 18 Bit ergeben und die in Tabelle 2 aufgeführten Bestandteile beinhalten.

Tabelle 2: Bestandteile des Paketkopfes nach [HOLT03]

Bits		Information	Inhalt
18	3	Active Member Address (Teilnehmeradresse)	Adresse, die jedem Gerät innerhalb eines Piconetzes vorübergehend durch den Master zugewiesen wird und somit jedes im Piconetz befindliche aktive Gerät eindeutig adressiert (3 Bits ermöglichen eindeutige Adressierung von $2^3 = 8$ aktiven Geräten im Piconetz; 000 = Master-Adresse, die für Broadcasts verwendet wird – daher Unterscheidung und Identifikation von bis zu $2^3 - 1 = 7$ aktiven Slaves möglich)
	4	Type (Pakettyp)	Typfeld dient der Kodierung des Pakettyps, da Pakete entweder der Steuerung oder zur Übertragung von asynchronen oder synchronen Datenpaketen dienen (mit 4 Bits sind $2^4 = 16$ verschiedene Pakettypen kodierbar)
	1	Flow-Bit (Flusskontrolle)	Flusssteuerung für den asynchronen Datenverkehr – wird ein Paket mit gelöscht Flow-Bit empfangen, wird die Datenübertragung angehalten <ul style="list-style-type: none"> - F = 0: Empfangspuffer ist voll, Übertragung gestoppt - F = 1: Übertragung weitergeführt
	1	Acknowledgement-number (Empfangsquittung)	Dient als Empfangsbestätigung von Paketen und quittiert den positiven bzw. negativen Empfang <ul style="list-style-type: none"> - ARQN = 1: positive Empfangsbestätigung (Paket erfolgreich empfangen) - ARQN = 0: negative Empfangsbestätigung (entspricht der Voreinstellung)
	1	Sequence Number (Sequenznummer)	Bit für die Folgenummer zur Erkennung von Paketverlusten
	8	Header Error Check (Prüfsumme)	Die Prüfsumme dient der Fehlerüberwachung – mit ihr kann festgestellt werden, ob Daten im Header verfälscht wurden

Da der Paketkopf wichtige Verbindungsinformationen in sich birgt, werden die enthaltenen Informationen durch einen Vorwärtsfehlerkorrekturmechanismus (Forward Error Correction; FEC) vor Störungen geschützt. Das Grundprinzip der Vorwärtsfehlerkorrektur beruht auf dem Versand redundanter Informationen, d.h. um Fehler bei der Übertragung zu kompensieren oder verlorene Pakete zu rekonstruieren, werden Informationen mehrfach versandt. Gegen die Kosten für eine geringe Erhöhung der Übertragungsrate des Bit-

stroms aufgrund redundanter Daten kann so der Aufwand einer Neuübertragung des kompletten Paketes eingespart werden. Im Fall des Bluetooth-Paketes werden die Bits des Paketkopfes dreifach versendet, sodass sich insgesamt eine Länge von 54 Bit (3x 18 Bit) für den Header ergibt (siehe nochmals Abbildung 9 oben). [HOLT03], [MULL01]

Den letzten Teil des allgemeinen Paketformats stellen die Nutzdaten dar, die nochmals in drei Segmente unterteilt werden können:

- Nutzdaten-Header (8 Bits),
- eigentlicher Nutzdatenteil (0 – 2721 Bits),
- unter Umständen CRC- (Cyclic Redundancy Check) Prüfsumme (16 Bits).

Die Struktur der Nutzdaten hängt vom Verbindungstyp ab, sodass das Nutzdatenfeld entweder als synchrones Sprachfeld oder als asynchrones Datenfeld ausgelegt sein kann. ACL-Pakete beinhalten das Datenfeld, SCO-Pakete nur das Sprachfeld (eine Ausnahme bilden sog. DV- (Data Voice) Pakete, die beide Felder enthalten). Nur Datenfelder verfügen über einen Nutzdaten-Header (1 oder 2 Bits lang), der die genutzten Kanäle festlegt und den Fluss in den Kanälen kontrolliert sowie insbesondere ein Nutzdaten-Längenkennzeichen enthält, das die Anzahl an Bytes in den eigentlichen Nutzdaten angibt. Der Nutzdatenteil beinhaltet schließlich die tatsächlichen Nutzerdaten. SCO-Pakete besitzen keine CRC-Prüfsumme und werden somit bei fehlerhafter Übermittlung oder bei Verlust nicht erneut übertragen. Einige der verfügbaren ACL-Pakete sind dagegen mit einer solchen CRC-Prüfsumme versehen und werden somit bei nicht korrigierbaren Fehlern erneut versandt. Neben Paketen für ACL- und SCO-Links gibt es auch gemeinsame Pakete, die beispielsweise zur Abfrage von Slaves, zur Synchronisation der Sprungfolge und zur Bestätigung von Datenübertragungen zur Verfügung stehen. Für eine genauere Beschreibung der verschiedenen Pakettypen sei an dieser Stelle auf [HOLT03] verwiesen.

Die verschiedenen Bluetooth-Datenpakete unterscheiden sich letztendlich nur in ihren Nutzdaten, der Zugangscode und der Paketkopf sind stets identisch. [GESS09]

3.6 Verbindungsaufbau

Die Einbindung von Geräten in einem Bluetooth-Netz kann auf verschiedene Art und Weise erfolgen – es existieren eine Reihe von Betriebsmodi, in denen sich ein Gerät befinden kann, bzw. unterschiedliche Verbindungszustände, die zwei Bluetooth-Geräte zueinander einnehmen können.

Solange ein Gerät nicht an einem Piconetz teilnimmt aber eingeschaltet ist, befindet es sich im Bereitschaftsmodus (**Standby**), der somit den Normalzustand darstellt. Im Standby-Modus wird nur die interne Uhr weiter betrieben, sodass die Stromaufnahme sehr gering ist. Um von diesem unverbundenen in den verbundenen Zustand zu wechseln, existieren zwei mögliche Erkundigungsmodi (**Inquiry**). So kann einerseits das Gerät selbst ein

Pikonetz aufbauen oder andererseits Erkundigen bzgl. bereits vorliegender Kommunikationen einholen. [BNUT03]

Möchte das Gerät selbst ein Piconetz aufbauen, sucht das Gerät zunächst nach in Funkreichweite befindlichen anderen Geräten mit denen es eine Verbindung aufbauen kann. Zu diesem Zweck sendet das Gerät den für alle Geräte identischen sog. Inquiry Access Code (IAC) über 32 standardisierte Trägerfrequenzen aus und wartet auf Reaktionen in Form von Datenpaketen mit Informationen zur Geräteadresse und Zeiteinstellungen. [HOLT03]

Beim reinen Erkunden bestehender Kommunikationen sucht das Gerät alle 1,28 Sekunden nach Netznachrichten. Dafür wechselt das Gerät periodisch vom Bereitschaftszustand in den Erkundigungszustand und lauscht auf den Trägerfrequenzen nach IAC-Nachrichten, die von anderen Geräten versandt werden. Sobald das Gerät solch eine Nachricht erkennt, sendet es selbst ein Datenpaket mit Geräteadresse und Zeitinformationen aus. Mittels dieser Informationen ist das andere Gerät, das zuvor den IAC ausgesendet hatte und somit als Master fungiert, in der Lage den Verbindungsaufbau einzuleiten. Mit dem Versenden des Datenpaketes an den Master arbeitet das Gerät als Slave. [HOLT03]

War die Erkundigung nach anderen Geräten erfolgreich, erfolgt der Wechsel in den Aufrufen-Modus (**Page**). Im Page-Modus wird versucht, eine Verbindung zu einem bereits gefundenen Gerät aufzubauen. Die Herstellung einer Verbindung und somit der Aufbau eines Piconetzes erfolgt auf Basis der Geräteadresse, die der Master während der Erkundigung von den einzelnen in Reichweite befindlichen Geräten empfangen hat. In Abhängigkeit dieser Geräteadresse berechnet der Master eine spezielle Sprungfolge mit der alle Geräte individuell aufgerufen werden können. Die Slaves antworten auf den Aufruf, synchronisieren sich mit der Uhr des Masters und passen sich so der Sprungfolge des durch den Master aufgebauten Piconetzes an. Sobald die Anpassung erfolgt ist, befindet sich das Gerät bzw. die Geräte im verbundenen Zustand und überprüfen den Funkkanal permanent auf Pakete mit passender Zieladresse, um gegebenenfalls zu antworten. [HOLT03]

Im verbundenen Zustand können die am Piconetz beteiligten Geräte durch Zuhören, Übertragen oder Empfangen an der Kommunikation innerhalb des Netzes teilnehmen. Jedes aktive Gerät besitzt eine 3 Bit große Active Member Address (AMA), die für die Dauer der Aktivität vorübergehend vom Master zugewiesen wird und das Gerät eindeutig als zum Piconetz dazugehörig identifiziert. Der Master synchronisiert die aktiven Geräte (maximal 7) zudem periodisch. Während des aktiven Modus nutzen Master und Slave den Übertragungskanal gemeinsam mittels TDD (Time Division Duplexing), d.h. der Master sendet ein Datenpaket und wartet im darauffolgenden Zeitschlitz (Slot) die Antwort des Slaves ab. Erst nach eingetretener Antwort wird das nächste Datenpaket durch den Master versandt. Aktive Slaves erwarten in den geradzahligen Slots Pakete des Masters.

Ein Wechsel aktiver Geräte zurück in den Bereitschaftsmodus ist ebenfalls möglich und erfolgt über eine Abtrennungsprozedur (detach). [HOLT03]

Da das Hauptanwendungsgebiet von Bluetooth im Bereich mobiler Endgeräte liegt, besteht ein besonderes Interesse, die Stromaufnahme möglichst gering zu halten. Zu diesem Zweck bietet Bluetooth die teilweise Einstellung der Sende- und Empfangsbereitschaft mittels spezieller Energiesparzustände an. In diesen Energiesparzuständen bleiben die Geräte trotz geringer Stromaufnahme im Piconetz synchronisiert und können je nach Bedarf wieder zugeschaltet werden, um erneut an der Kommunikation teilzunehmen. Der Verbunden-Zustand umfasst in diesem Sinne neben dem aktiven Zustand auch die drei Energiesparzustände parken (park), schnüffeln (sniff) und halten (hold). Ein Slave kann solch einen Energiesparzustand entweder selbst einnehmen oder vom Master in einen der Zustände gesetzt werden. [BNUT03]

Beim **Schnüffeln** („Sniff-Prinzip“ siehe Abbildung 10) wird die Häufigkeit reduziert, mit der ein Slave die Pakete des Masters empfängt. Der Masteraufruf wird dann nur noch in vorher zwischen Master und Slave abgestimmten, periodischen Intervallen empfangen und ausgewertet. Da der Slave periodisch aktiv wird und in diesen Zeitabständen wie im normalen aktiven Zustand senden und empfangen, also mit dem Master kommunizieren kann, bleibt die zeitliche Synchronisation dauerhaft erhalten. Durch die flexible Einstellung der aktiven und inaktiven Zeitverhältnisse kann die Stromaufnahme indirekt beeinflusst werden. Der Sniff-Modus ist dennoch von den drei Energiesparzuständen, der Zustand mit der höchsten Leistungsaufnahme. [HOLT03]

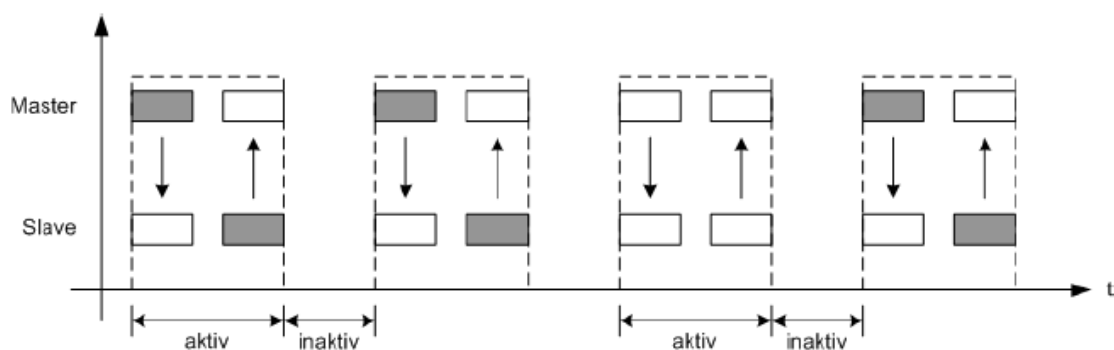


Abbildung 10: Sniff-Prinzip [BNUT03]

Das **Halten** („Hold-Prinzip“ siehe Abbildung 11) im Piconetz ist gleichzusetzen mit der Einstellung der gesamten Übertragungstätigkeit eines Slaves für einen vorgegebenen Zeitraum. Dabei behält das Bluetooth-Gerät die ihm zugeteilte Active Member Address sowie Synchronisationsinformationen, beendet jedoch sämtliche ACL-Übertragungen. SCO-Übertragungen können weiterhin übertragen bzw. empfangen werden, sodass eine aktive Teilnahme an der Kommunikation anderer Piconetze möglich ist. Nach Ablauf der eingestellten Zeitspanne synchronisiert sich der Slave automatisch mit dem Piconetz und ist damit wieder bereit die an ihn adressierten Pakete des Masters zu empfangen. Der Hold-Modus kann durch den Master erzwungen werden. Aufgrund der zeitlich begrenzt-

ten, kompletten Einstellung der Übertragung ist die Stromaufnahme im Vergleich zum Sniff-Modus geringer. [BNUT03]

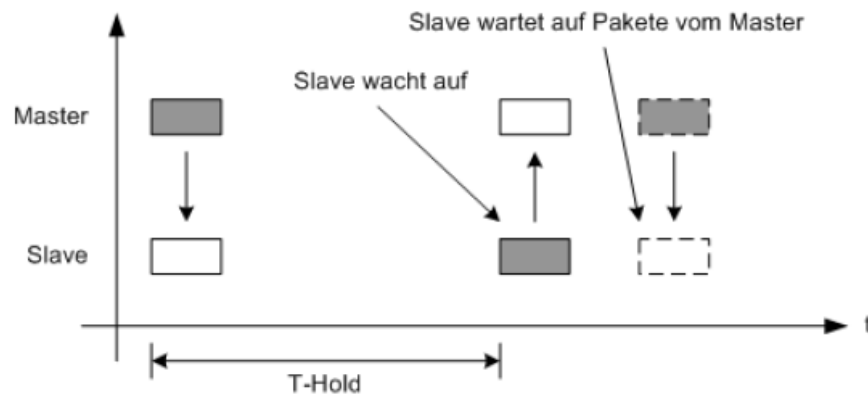


Abbildung 11: Hold-Prinzip [BNUT03]

Beim **Parken** („Park-Prinzip“ siehe Abbildung 12) nimmt der Slave nicht mehr aktiv an der Kommunikation des Piconetzes teil, sodass in diesem Zustand die Stromaufnahme nach dem Standby-Zustand am geringsten ist. Der Slave verliert zwar in diesem Modus sein Active Member Address, die Synchronisation mit dem Master wird jedoch aufrecht erhalten. Um weiterhin identifizierbar für den Master zu bleiben, erhält der Slave alternativ zur AMA eine sog. Parked Member Address (PMA), die 8 Bit groß ist und mit der somit bis zu 255 zusätzliche Bluetooth-Geräte durch einen Master geparkt werden können. Das Parken von Geräten wird über ein sog. Beacon-Verfahren realisiert. Hierbei sendet der Master zu bestimmten Zeitpunkten (Beacon-Zeitschlitz), in denen die Slaves kurz aufwachen um sich erneut zu synchronisieren, Pakete an die geparkten Slaves. Über dieses Verfahren ist die Reaktivierung von Slaves oder auch der Versand von Broadcast-Nachrichten möglich. Der Park-Modus erlaubt neben der Reduzierung der Energieaufnahme beim Slave auch die indirekte Aufnahme von mehr als sieben Slaves und somit die Erhöhung der Teilnehmerzahl innerhalb eines Piconetzes. [MULL01], [HOLT03]

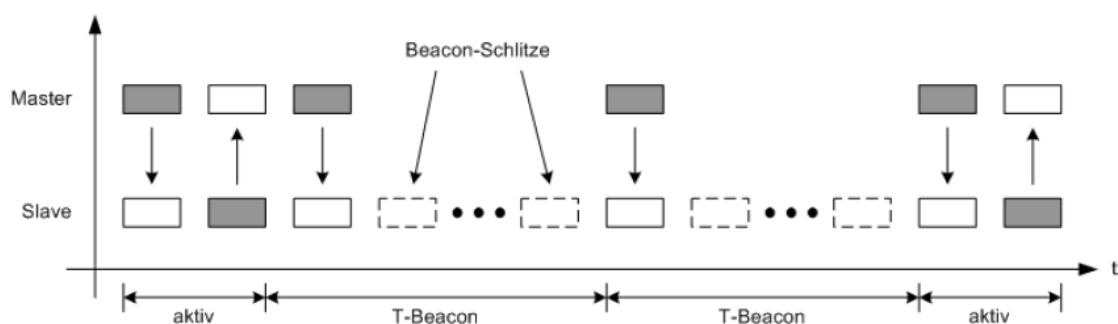


Abbildung 12: Park-Prinzip [BNUT03]

Der Übergang zwischen den verschiedenen Betriebsmodi ist in Abbildung 13 dargestellt. Die Übersicht zeigt, dass der Normalzustand (Standby), in dem ein Gerät nicht mit einem Piconetz verbunden ist, durch Inquiry oder Paging eines Masters aufgehoben werden

kann. Nach erfolgreichem Paging erhält der Slave eine Active Member Address (AMA) durch den Master und ist somit diesem Master bzw. des durch ihn synchronisierten Piconetzes zugeordnet. Der Slave ist in diesem Status mit dem Piconetz verbunden und kann aktiv an der Kommunikation teilnehmen. Der Master kann den Slave wiederum in verschiedene Energiesparmodi versetzen, wobei der Slave beim Park-Zustand seine AMA verliert und stattdessen die PMA zur Identifizierung erhält. Eine vollkommene Trennung eines Slaves aus dem Piconetz ist ebenfalls durch Abgabe der AMA möglich – der Slave fällt dann automatisch in den unverbundenen Standby-Zustand zurück. [HOLT03]

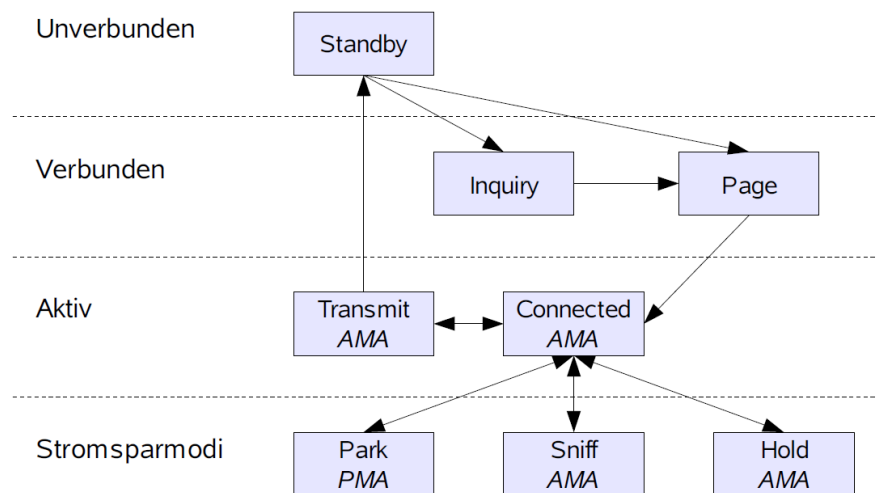


Abbildung 13: Betriebsmodi von Bluetooth-Geräten [HOLT03]

Hinsichtlich des Stromaufnahme-Aspektes bestehen folgende Abstufungen zwischen den verschiedenen Modi hinsichtlich ihrer Leistungsaufnahme: Unter Annahme einer zur Verfügung stehenden 600mAh-Batterie reicht die Energieversorgung für ein Bluetooth-Modul im Standby-Zustand etwa 3 Monate. Beim Wechsel in den aktiven Zustand verringert sich die Laufzeit im aktiven Sprachmodus auf 60 h, im aktiven Datenmodus auf 100 h. In den Energiesparzuständen Hold bzw. Park würde dagegen die Energieversorgung für 1 Jahr ausreichen. [BNUT03]

3.7 Reichweite

Bei der drahtlosen Kommunikation zwischen zwei Geräten dämpft der Funkkanal grundsätzlich das vom Sender zum Empfänger ausgestrahlte Signal. Zusätzlich besteht nicht immer eine direkte Sichtverbindung (Line of Sight) zwischen Sender und Empfänger. Infolgedessen treten Reflektions-, Streuungs-, Beugungs- und Abschattungseffekte auf. Ein Problem stellen hierbei insbesondere Mehrwegeausbreitungen dar, wodurch die Funkwellen den Empfänger zu unterschiedlichen Zeiten erreichen und sich überlagern oder zum Teil sogar gegenseitig auslöschen. In Abhängigkeit von Baustoffen, Größe und Bauart eines Gebäudes treten weitere Dämpfungseffekte auf. [GESS09]

Aus Systemsicht hängen die erzielbaren Reichweiten insbesondere von den verschiedenen Leistungsklassen, denen Bluetooth-Geräte zugeordnet werden können, ab. Die Leis-

tungsklasse ergibt sich häufig über das Anwendungsprofil bzw. aus den Sender- und Empfängereigenschaften der jeweiligen Geräte. Geräte, die mit kleinen bzw. schwachen Akkus betrieben werden, wie mobile Geräte (z.B. Handy, PDA) oder auch Peripheriegerä- te (z.B. Tastatur und PC-Maus), besitzen in der Regel nur eine geringe Sendeleistung von 1mW, da eine geringe Sendeleistung eine geringere Leistungsaufnahme und damit eine höhere Batterielevensdauer bedeutet. Andere (teilweise stationäre) Geräte wie bei- spielsweise Drucker und Notebooks verfügen dagegen über eine höhere Sendeleistung von 100mW. Entsprechend der Sendeleistung ergeben sich drei Leistungsklassen und daraus folgend die maximal erreichbaren Reichweiten der jeweiligen Leistungsklasse (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Bluetooth-Leistungsklassen nach [BSPE09]

Leistungsklasse	maximale Leistung	maximale Reichweite
1	100 mW (20 dBm)	100 m
2	2,5 mW (4 dBm)	20 m
3	1 mW (0 dBm)	10 m

Die Leistung L wird in dBm (Dezibel Milliwatt – Leistungspegel in Dezibel bezogen auf 1mW) angegeben und errechnet sich nach [BNUT03] über die folgende Formel 1:

$$L = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P}{1mW} \right); \text{ in [dBm]}$$

Formel 1

Mit P wird hierbei die Ausgangsleistung in mW verstanden. Die Sendeleistung eines Ge- rätes ist regelbar - einerseits um die Stromaufnahme zu reduzieren, andererseits um in Abhängigkeit von der Signalqualität auf veränderte Umgebungsbedingungen reagieren zu können. Die Notwendigkeit zur Steuerung der Sendeleistung wird anhand der Emp- fänger-Empfindlichkeit festgemacht. Die Empfänger-Empfindlichkeit gibt die Leistung des ankommenden Signals am Eingang des Empfängers an, die erforderlich ist, um das Signal in ausreichender Güte einer weiteren Verwendung zur Verfügung zu stellen. Als Maß für diese Güte wird die sog. Bitfehlerrate (Bit Error Rate; BER) herangezogen. In der Blue- tooth-Spezifikation wird eine Empfänger-Empfindlichkeit von $-70dBm$ (entspricht ei- nem Eingangssignal mit 100pW [1 Picowatt = 10^{-12} W]) für eine BER von kleiner 0,1% ge- fordert. Die Leistungssteuerung erfolgt über den sog. Receiver Signal Strength Indicator (RSSI) – dieser vergleicht das empfangene Signal mit einem für normale Empfangspegel typischen Bereich (Golden Receive Power Range) und fordert eine Korrektur an sofern der Empfangspegel außerhalb dieses Bereichs liegt. Die Leistungsanpassung erfolgt dar- auf aufbauend schließlich durch den Master. Mittels der an den Master gesendeten An- forderung des Slaves zur Erhöhung oder Reduktion der Sendeleistung als Antwort auf das zuvor vom Slave empfangene Signal, kann der Master individuell für jeden einzelnen Sla- ve die Anpassung der Sendeleistung vollziehen. Durch die individuelle Anpassung ist die

Berücksichtigung unterschiedlicher Entfernungen der einzelnen Geräte zum Master möglich. [GESS09], [BNUT03]

Neben der Sendeleistung des Senders und der Empfindlichkeit des Empfängers bestehen weitere systembedingte Abhängigkeiten hinsichtlich der räumlichen Abdeckung. So spielen die Bauformen der Sende- und Empfangsantennen sowie die Datenpakettypen mit ihren unterschiedlichen Paketlängen und Sicherungsmechanismen eine wesentliche Rolle bei der erreichbaren Entfernung.

Es ist zu beachten, dass die in den Leistungsklassen angegebenen Reichweiten nur im freien Raum gelten, in Innenräumen liegen die maximalen Reichweiten für Geräte, die im Frequenzbereich von 2,45 GHz arbeiten, aufgrund vermehrter Reflektionsflächen und damit einhergehender Mehrwegeausbreitung lediglich im Bereich von etwa 14 Metern (rein theoretischer Wert - in der Praxis sind die Inhaus-Reichweiten meist noch geringer). [GESS09]

Verglichen mit der Infrarot-Technologie, die ebenfalls als Schnittstelle zwischen Geräten auf kurzen Distanzen verwendet wird, jedoch nur bei vorliegender Sichtverbindung einsatzfähig ist, bietet Bluetooth in diesem Zusammenhang den entscheidenden Vorteil, dass für die Verwendung dieser Funktechnologie keine Sichtverbindung bei der Kommunikation zwischen den Geräten bestehen muss. Gegenstände innerhalb der Sichtverbindung dämpfen zwar, wie oben beschrieben, die erreichbaren Distanzen, schließen jedoch die Übertragung nicht vollkommen aus. [GESS09]

3.8 Datenschutz und Sicherheitsmaßnahmen

Bei drahtlosen Verfahren bildet die Luftschnittstelle bei der Datenübertragung ein erhöhtes Sicherheitsrisiko. Übertragene Daten können hierbei wesentlich leichter durch Dritte empfangen oder sogar manipuliert werden als das bei drahtgebundenen Technologien der Fall ist. Die zu übermittelnden Daten müssen entsprechend vor dem Zugriff Unbefugter geschützt werden. Der Begriff des Datenschutzes bezieht sich nicht nur auf technische Maßnahmen zum Schutz personenbezogener Daten sondern impliziert auch Gesetze über das Verbot der Weitergabe von Daten.

Die Schutzmaßnahmen technischer Systeme werden speziell unter dem Begriff der Datensicherheit zusammengefasst und umfassen den Schutz der Daten hinsichtlich gegebener Anforderungen an deren Vertraulichkeit, Integrität und Verfügbarkeit. Zur Einhaltung der Vertraulichkeit dürfen Daten ausschließlich von autorisierten Benutzern gelesen bzw. modifiziert werden – dies beinhaltet, dass ein Zugriff auf gespeicherte Daten insbesondere während der Datenübertragung erst über eine Authentisierung, d.h. per Überprüfung der Station auf Berechtigung zur Teilnahme am Netzwerk, möglich sein darf. Integrität bedeutet, dass die Daten während der Übertragung nicht unbemerkt verändert werden dürfen. Dies bezieht sich nicht auf zufällige Veränderungen aufgrund von Störungen im Übertragungskanal (Übertragungsfehler), sondern auf gezielte Eingriffe (Datensabotage). Solange die Veränderungen auf Empfängerseite so geartet sind, dass eine

Korrektur möglich ist, ist die Integrität gewährleistet. Treten jedoch ein oder mehrere nicht korrigierbare Veränderungen auf, muss von einer Sicherheitslücke ausgegangen werden, die sowohl dem Empfänger als auch dem Absender zur Kenntnis gebracht werden müssen. Die Verfügbarkeit der Daten bezieht sich dagegen auf den Nachrichtenkanal und dessen Eigenschaften (z.B. räumliche Entfernung, Energieversorgung). Zur Erfüllung der Verfügbarkeit sollte eine stabile Datenübertragung zeitunabhängig zur Verfügung stehen – daher wird auch zur Einhaltung der Vollständigkeit gefordert, „dass eine vorgegebene Fehleranzahl pro Zeiteinheit nicht überschritten wird bzw., dass aufgetretene Fehler erkannt und korrigiert werden können.“ [GESS09]

Bluetooth bietet zum Schutz der Daten eine Vielzahl von Sicherheitsmechanismen an:

- initiale Paarbildung (Pairing) + Verbindungsschlüssel,
- Authentifizierung,
- Verschlüsselung.

„Alle Sicherheitsfunktionen auf Verbindungsebene basieren auf dem Konzept der Verbindungs-codes. Bei diesen Zugriffsschlüsseln handelt es sich um zufällige 128-Bit-Zahlen, die einzeln für verschiedene Gerätepaare gespeichert werden.“ [BNUT03]

Zur Nutzung der vorhandenen Sicherheitsmechanismen müssen zwei Geräte zunächst, sofern sie zuvor noch nicht miteinander kommuniziert haben, gepaart werden. Bei der Paarung handelt es sich um ein Initialisierungsverfahren, bei dem zwei Geräte, die erstmals miteinander kommunizieren, einen gemeinsamen Verbindungscode erzeugen, der für die nachfolgende Authentifizierung verwendet wird. Dafür muss bei der ersten Verbindung ein Bluetooth-Sicherheitscode oder eine PIN (Personal Identification Number), die bis zu 16 Byte lang sein können, eingegeben werden. Verfügt ein Gerät bereits über eine PIN, muss diese im anderen Gerät eingegeben werden. Geräte mit zwei festen PINs können nicht gepaart werden.

Aus der PIN, den Geräteadressen und zwei Zufallszahlen (jedes Gerät erzeugt jeweils eine Zufallszahl) wird zumeist ein 128 Bit langer Kombinationschlüssel erzeugt, der für die weitere Verwendung in beiden Geräten als Verbindungsschlüssel (Link Key) gespeichert und zur Authentifizierung genutzt wird. Der Verbindungsschlüssel wird temporär in den gepaarten Geräten gespeichert – solange der aktuelle Code in beiden Geräten gespeichert ist, ist keine erneute Pairing-Prozedur erforderlich. [MULL01]

Für die Authentifizierung wird ein Challenge-Response- (Aufforderung-Antwort) Verfahren eingesetzt, bei dem sich nur eines der beiden Geräte (Anspruchsteller/ Claimant) gegenüber dem anderen (Verifier) authentisiert. Hierfür schickt der Verifier eine Zufallszahl als Aufforderung zur Authentisierung an den Claimant, woraufhin dieser aus der Zufallszahl, dem Verbindungsschlüssel und seiner eigenen Geräteadresse eine Antwort erstellt und diese wiederum an den Verifier zurücksendet. Die Antwort zeigt dem Verifier, dass

der Claimant den gemeinsamen Verbindungsschlüssel kennt und somit authentifiziert ist. Da die Authentifizierungsprozedur einseitig ist, kann eine gegenseitige Authentifizierung beider Geräte nur erreicht werden, wenn der Vorgang nochmals mit vertauschten Rollen vollzogen wird. [BNUT03]

Die Verschlüsselungsprozedur ist optional und erfordert keine Benutzereingaben. Die Verschlüsselung stellt die Voraussetzung für den Zugriff auf Dienste dar, d.h. die Verbindung muss zunächst in den verschlüsselten Modus wechseln bevor ein Zugriff gewährt werden kann. Dafür wird nach erfolgreicher Authentifizierung und Bestätigung des aktuellen Verbindungscode für jede Kommunikationssitzung zwischen zwei Geräten ein neuer Schlüssel zur Verschlüsselung (Chiffrierschlüssel) erzeugt. Die eigentliche Chiffrierung erfolgt über einen Nutzlastschlüssel (bestehend aus Chiffrierschlüssel, Geräteadresse und Zeittakt des Masters), der für jedes Datenpaket einzeln erzeugt und mit dessen Hilfe die Verschlüsselung als Vergleich in Form einer XOR-Operation der Nutzdaten mit dem Nutzdatenschlüssel vollzogen wird. Die Länge des Chiffrierschlüssels kann je nach gewünschter Sicherheitsstufe variieren (zwischen 8 Bit und 128 Bit). Es existieren insgesamt 3 Sicherheitsstufen [MULL01]:

- *Security Mode 1 (non-secure)*: Es existieren keine Sicherheitsvorkehrungen – Geräte ignorieren die Sicherheitsfunktionen der Sicherungsschicht. Daher nur für nicht-sicherheitskritische Anwendungen geeignet.
- *Security Mode 2 (service level enforced)*: Sicherheitsmaßnahmen existieren erst nach erfolgreichem Verbindungsaufbau – je nach Vertrauenseinstufung (vertrauenswürdig = trusted; nicht vertrauenswürdig = non-trusted) existieren gewisse Zugriffsrechte auf Dienste. Vertrauenswürdige Geräte stehen in einer festen Beziehung (sind gepaart) und haben uneingeschränkten Zugriff auf alle Dienste. Bei nicht vertrauenswürdigen Geräten ist der Zugriff beschränkt. Sicherheit besteht somit auf Diensteebene. Speziell bei parallel ablaufenden Anwendungen mit unterschiedlichen Sicherheitsanforderungen geeignet
- *Security Mode 3 (link level enforced)*: Sicherheit besteht auf Sicherungsebene – der Link Manager sorgt für alle Anwendungen bei der Verbindungseinrichtung für die Einhaltung der Sicherheitsvorkehrungen auf einem gemeinsamen Niveau. Daher erfolgt in diesem Modus generell eine Verschlüsselung beim Verbindungsaufbau – die Verschlüsselung der übertragenen Daten ist jedoch optional.

Eine Verschlüsselung kann von Seiten des Slaves beantragt werden, dem Master obliegt jedoch die Einleitung der Prozedur. [BNUT03]

Neben den technischen Sicherheitsmaßnahmen tragen auch die geräteimmanenten Eigenschaften wie das Frequenzsprungverfahren und die relativ geringe Reichweite zur Einschränkung der Sicherheitsrisiken bei, dennoch sind Sicherheitslücken nicht vollständig auszuschließen.

Ein hohes Datenschutz-Risiko stellt insbesondere die 48-Bit große Geräteadresse eines jeden Bluetooth-Gerätes dar anhand derer ein Gerät eindeutig identifiziert werden kann. Die Geräte-Adresse ist aufgrund der Inquiry-Operation öffentlich zugänglich. Sofern ein Zusammenhang zwischen dem entsprechenden Gerät und der besitzenden Person hergestellt werden kann, ergibt sich aufgrund der Eindeutigkeit ein Datenschutzproblem. Durch einen unbefugten Zugriff bestünde die Möglichkeit, die Aktivitäten des Gerätes und somit rückwirkend des Besitzers zu verfolgen und so Bewegungsprofile zu erstellen.

Für die im Weiteren durchgeführten Betrachtungen ist dieser Aspekt von besonderer Wichtigkeit, da bei der Verwendung der Bluetooth-Technologie im Verkehrsbereich insbesondere die Eigenschaft der frei zugänglichen Erkennung der öffentlichen Geräteadresse zum Tragen kommt. Das Prinzip der Detektierung von Fahrzeugen mittels Bluetooth basiert auf der Erkennung der Geräteadresse, sodass hier besondere sicherheitstechnische Maßnahmen zur Wahrung des Datenschutzes getroffen werden müssen.

3.9 Einschränkungen

Mit Bluetooth als Schnittstelle zur Peripherie kann eine Vernetzung verschiedenster Geräte auch außerhalb einer fest integrierten Netzinfrastruktur erfolgen. Die in der Bluetooth-Spezifikation definierten Profile und Einsatzszenarien bieten in ihrer Komplexität eine enorme Vielseitigkeit insbesondere für den Einsatz der Bluetooth-Technologie in fast jedem Bereich der Short-Range-(Kurzstrecken) Daten- und Audio-Übertragung. [BNUT03]

Aus den systemimmanenten Eigenschaften ergeben sich gewisse Einschränkungen, die für weitere Betrachtungen im Sinne anderweitiger Verwendungsszenarien von Bluetooth Beachtung finden sollten.

In Tabelle 4 sind die wesentlichen Eigenschaften der Bluetooth-Spezifikation nochmals zusammengefasst und den aus ihnen resultierenden Einschränkungen gegenübergestellt.

Tabelle 4: Einschränkungen basierend auf Bluetooth-Eigenschaften nach [BNUT03]

Eigenschaften	Einschränkungen
Point-to-Point- und Point-to-Multipoint-Verbindungen	<ul style="list-style-type: none"> - lediglich 8 Geräte pro Piconetz - Erweiterung zu Scatternetzen auch nur in begrenztem Maße möglich
Sprach- und Datenverbindungen	<ul style="list-style-type: none"> - maximale Datenrate von 723,2 kBit/s - begrenzte Datenmenge - begrenzte Reichweite
lizenfreies ISM-Band	<ul style="list-style-type: none"> - ISM-Band ist überfüllt - gegenseitige Störungen der im 2,4 GHz-Band funkenden Technologien möglich
geringe Sendeleistung	- geringe Reichweite
geringer Stromverbrauch	- geringe Sendeleistung
Frequenzsprungverfahren, Fehlerkorrektur	<ul style="list-style-type: none"> - Verbindungsaufbau dauert lange (erstmaliges Finden von Geräten kann bis zu 10 sec beanspruchen) - Latenzzeiten
Sicherheitsmaßnahmen (Paarung, Authentifizierung, Verschlüsselung)	- Geräteadresse ist öffentlich und frei zugänglich beim Inquiry-Vorgang (Datenschutzproblematik)

4 Bluetooth als Detektionssystem im Verkehrsbereich

Ursprünglich als Kabelersatz für die Verbindung unterschiedlicher Geräte konzipiert, wurden in den letzten Jahren zunehmend weitere Anwendungsfelder für die Bluetooth-Technologie aufgetan. Auch im Verkehrssektor existieren Ansätze und darüber hinaus sogar bereits erfolgte Implementierungen bzgl. des Einsatzes von Bluetooth im Bereich der Verkehrserfassung. Im folgenden Kapitel sollen die verschiedenen Einsatzmöglichkeiten von Bluetooth im Kontext der Verkehrsdetektion aufgezeigt werden. Dafür soll zunächst das grundlegende Prinzip der Erfassung des Verkehrsgeschehens mittels Bluetooth erläutert sowie die Eignung der Bluetooth-Detektion für die Verkehrslageerfassung anhand der für Detektoren geltenden Qualitätsanforderungen überprüft werden. Ziel soll es dabei sein, die Leistungsfähigkeit von Bluetooth als Verkehrsdetektor darzustellen sowie in einer Gegenüberstellung mit anderen, in der Praxis gängigen Detektoren, den Wert von Bluetooth für die zukünftige Verkehrslageerfassung herauszuarbeiten.

Im zweiten Teil dieses Kapitels stehen dann die bereits implementierten Anwendungen, derzeitige Forschungsschwerpunkte sowie mögliche weitere Anwendungsfelder der Bluetooth-Technologie im Kontext der Verkehrserfassung im Mittelpunkt.

4.1 Die Bluetooth-Technologie Detektion

4.1.1 Aufbau

Ein einfacher Verkehrsdetektor auf Bluetooth-Basis besteht hardwaretechnisch im Wesentlichen aus vier Teilen:

- Bluetooth-Adapter
- Antenne
- Rechner
- Akkumulator (ggf. in Ergänzung mit Solarpanel)

Der Bluetooth-Adapter ist ein Adapter mit externem Antennenanschluss, der je nach gewählter Klassierung in der Lage ist, einen gewissen Erfassungsradius abzudecken (Funkreichweiten von 1m bis 100m; siehe dazu Kapitel 3) und innerhalb dessen andere Bluetooth-fähige Geräte zu erkennen bzw. mit ihnen eine Verbindung aufzubauen.

Bei Nutzung von Bluetooth-Adaptoren mit externem Antennenanschluss sind zumeist Stummelantennen mit einem Antennengewinn von 1 dBi im Lieferumfang enthalten – diese omnidirektionalen Stummelantennen reichen für einfache Anwendungen aus. Bei gewünschter Erhöhung der Reichweite werden ggf. zusätzliche Antennen benötigt. Hierbei können beispielsweise omnidirektionale (für eine gleichmäßige Abdeckung in alle Richtungen) oder auch direktionale Antennen (für Abstrahlungen mit Richtwirkung) mit Wellenlängen von 2,4 GHz zum Einsatz kommen.

Als Rechner wird vorzugsweise ein Mini-PC mit ARM-Technologie verwendet, der platz- und stromsparend zugleich ist und dennoch eine hohe Leistung aufweist. ARM (Advan-

ced RISC Machine) ist nicht direkt mit marktüblicher PC-Technik vergleichbar, sondern bezeichnet ein Prozessordesign für eine Familie von 32-Bit-Mikroprozessoren, die auf dem sog. RISC-(Reduced Instruction Set Computer) Konzept basieren. Diese Rechnerarten mit reduziertem Befehlssatz verzichten auf komplexe Befehle, wodurch RISC-Prozessoren in der Lage sind sehr effizient zu arbeiten.

Die Stromversorgung einer einfachen Bluetooth-Messeinrichtung, die mobil und damit unabhängig von kabelgebundener Energiezufuhr ist, kann über einen Akkumulator (Akkumulator) erfolgen. Als Akku kommen beispielsweise Bleigel-Akkumulatoren mit 12 V Spannung und einer Nennladung von 12 Ah in Frage. Diese Akkus sind für eine langsame Stromentnahme konstruiert und bieten daher eine deutlich höhere Lebensdauer bei hohem Leistungsvermögen gegenüber normalen Bleiakkumulatoren. Da die Bleigel-Akkus vollständig geschlossen sind, sind sie unempfindlich gegen Verkipfung und können daher horizontal sowie vertikal gelagert werden - dieser Aspekt kommt insbesondere auch bei der Installation der späteren Messeinrichtung zum Tragen. Als Ergänzung zum Akkumulator kann ggf. ein Solarpanel zum Einsatz kommen, das eine zwischenzeitliche Aufladung des Akkus ermöglicht.

Zusätzlich zu den genannten Hauptkomponenten kommen noch weitere Hardware-Bestandteile, wie Speichermedien (z.B. SD-Karte oder USB-Stick), Antennenzubehör und Verkabelungen (z.B. USB-Kabel), Befestigungsmaterialien, wie Schellenbänder, mit denen der Detektor beispielsweise an Laternenmasten befestigt werden kann sowie ein wasserdichter, abschließbarer Koffer, der die gesamten Einzelteile beherbergt, hinzu.

Damit der Bluetooth-Detektor schließlich funktionsfähig ist, wird neben der Hardware auch noch eine spezielle Software – in diesem Fall ein Bluetooth-Discovery-Script – benötigt, mit der letztendlich die Hardware gesteuert wird, um die in der Umgebung befindlichen MAC-Adressen anderer Bluetooth-fähiger Geräte zu erfassen und diese versehen mit einem Zeitstempel kontinuierlich zu protokollieren. Die erfassten Daten werden der Einfachheit halber in eine Textdatei geschrieben, auf einem internen Speichermedium archiviert und können später ausgelesen werden.

Der Aufbau eines prototypischen Detektors auf Bluetooth-Basis, wie er Anfang des Jahres 2011 innerhalb eines Projektes des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt erstellt wurde, ist in Abbildung 14 dargestellt.

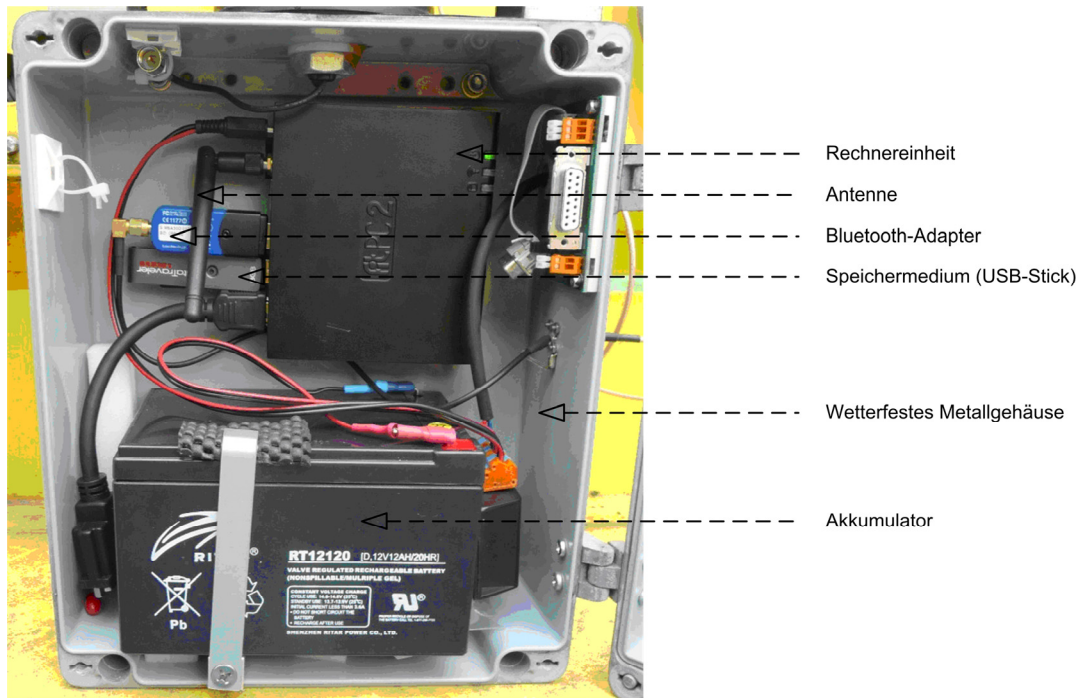


Abbildung 14: Aufbau des beim DLR entwickelten Bluetooth-Detektors

4.1.2 Funktionsweise

Beim Einsatz von Bluetooth im Verkehrsbereich wird ausgenutzt, dass jedes bluetoothfähige Gerät eine eindeutige 48-Bit lange Geräte-Adresse (Media Access Control; MAC) besitzt. Mittels dieses Identifikationsmerkmals können Geräte erkannt und wiedererkannt werden. Für die reine Erkennung ist es dabei unerheblich, ob sich das entsprechende Gerät im Freien oder innerhalb eines Raumes befindet. Hierbei kommt der Erkennung mittels Bluetooth die Eigenschaft zugute, dass keine Sichtverbindung zwischen dem erfassenden und dem detektierten Gerät bestehen muss und somit auch Geräte im quasi nach außen hin abgeschlossenen Innenraum eines Fahrzeuges erfasst werden können. Darüber hinaus besteht keine Notwendigkeit, dass die detektierten Bluetooth-Geräte stationär, also unbewegt, sind – auch mobile Geräte z.B. innerhalb eines sich bewegenden Fahrzeuges können erkannt werden solange sie sich für eine gewisse Zeit in Reichweite einer Detektionseinrichtung befinden. Wird also ein in einem Fahrzeug befindliches Bluetooth-Gerät erkannt, ist diese Geräteerkennung gleichbedeutend mit der Erfassung des Fahrzeuges selbst – die Bluetooth-Technologie kann demnach zur Fahrzeugerkennung eingesetzt werden. Das Prinzip ist in Abbildung 15 veranschaulicht.

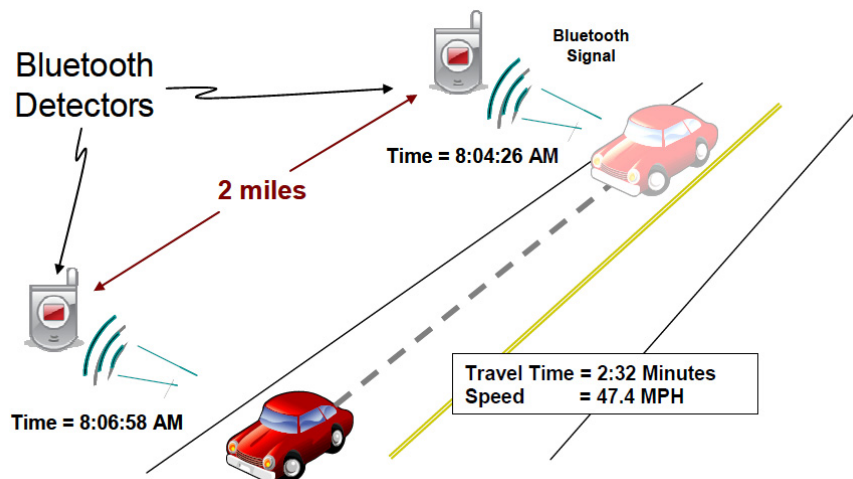


Abbildung 15: Prinzipskizze der Bluetooth-Detektion [MARY08]

Die Fahrzeugerkennung mittels Bluetooth basiert grundlegend auf der Ausnutzung der spezifischen Eigenschaften des Inquiry-Betriebsmodus und dem sich daraus ergebenden öffentlichen Zugang zu den eindeutigen Adressen bluetoothfähiger Geräte. Das Prinzip des Inquiry wurde bereits eingehend in Kapitel 3 beschrieben. Da die verschiedenen Geräte mit aktiviertem Bluetooth periodisch auf den Trägerfrequenzen nach Nachrichten anderer Geräte in der Umgebung lauschen und ihre eigene Geräteadresse preisgeben sobald sie sich in Reichweite einer Nachrichten aussendenden Einheit befinden, genügt lediglich die Aufnahme dieser Geräteadresse, um das Vorhandensein eines Fahrzeuges zu erkennen. Ein weiterer Verbindungsaufbau zu dem erkannten Gerät ist nicht nötig, sodass das detektierte Gerät weder über diese Informationsverwertung in Kenntnis gesetzt werden muss noch weitere Authentifizierungs- und Verschlüsselungsschritte folgen müssen um einen darüber hinaus gehenden Informationsaustausch einzuleiten: „Bei der Beschreibung der VerbindungsaufbauprozEDUREN wird klar, dass ein Gerät seine eindeutige Bluetooth-Geräteadresse auch ohne anschließende Verbindung im FHS-Paket [Frequency Hopping Synchronization Paket; enthält Geräteadresse und Wert der Systemuhr als Antwort auf Inquiry-Vorgang] preisgeben muss. Diese Eigenschaft lässt sich für die Verfolgung von Spuren einzelner Geräte nutzen.“ [BNUT03]

Speziell für die Detektion von Fahrzeugen genügt dementsprechend die einfache Information über das Vorhandensein eines bluetoothfähigen Gerätes in Form der eindeutigen Geräteadresse verbunden mit einem Zeitstempel, um die Verkehrslage zu erfassen.

Datum	Uhrzeit	MAC-Adresse	ggf. Gerätename
2011-03-21	00:19:33.172701	00:24:7D:50:1C:0C	Sony Ericsson W850i

Die Nutzung der frei verfügbaren MAC-Adressen der mobilen Geräte ist ein wesentlicher Vorteil der Detektion mit Bluetooth. Sie impliziert die Unabhängigkeit zusätzlicher, zu installierender fahrzeugseitiger Einrichtungen und das bei dennoch eindeutiger Identifizierbarkeit eines Fahrzeuges, wie sie bisher nur mit Hilfe automatischer Kennzeichener-

hebungen per Videokamera realisiert werden konnte. Gleichzeitig stellt die Erfassung dieser eindeutigen Geräteummer jedoch auch ein erhöhtes datenschutzrechtliches Sicherheitsrisiko dar. Theoretisch betrachtet, ist die MAC-Adresse keine personalisierte Geräteerkennung, da die MAC-Adresse nicht in Verbindung mit den entsprechenden Kundendaten in einer Datenbank gespeichert wird. Zudem ist der Nutzer in der Lage die Einstellungen seines Gerätes so anzupassen, dass das Gerät nicht erkannt werden kann (z.B. Einstellung des Erkennungsmodus auf ‚Unsichtbar‘). Dennoch besteht unter gewissen Umständen mit Hilfe der MAC-Adresse die Möglichkeit zur Ableitung von Fahrprofilen und darüber auch zur Personalisierung der erfassten Fahrzeuge. Da Bluetooth-Geräte zudem typischerweise ‚Personal Devices‘ sind, kann davon ausgegangen werden, dass stets dieselbe Person anwesend ist, wenn eine spezielle MAC-Adresse als anwesend erkannt wird. Sollen die Daten gespeichert werden, muss dementsprechend zur Wahrung des Datenschutzes eine Identifizierung ausgeschlossen bzw. soweit erschwert werden, dass der Aufwand zur Identifizierung in keinem vernünftigen Maß zum erzielbaren Informationsgehalt steht. Dies kann beispielsweise über die Verschlüsselung der erfassten MAC-Adressen in zufällige Zahlencodes erfolgen. Neben der MAC-Adresse kann auch ein dem Gerät vom Nutzer zugeordneter Name erfasst werden. Anhand dieses Namens besteht gleichfalls die Möglichkeit zur Personalisierung – er sollte daher ebenso verschlüsselt bzw. komplett gelöscht werden.

4.2 Qualitative Beurteilung der Bluetooth-Technologie als Verkehrsdetektor

Zur Betrachtung der Eignung der Bluetooth-Detektion für die Verkehrslageerfassung sollen zunächst die allgemein hin geltenden Anforderungen an Verkehrsdetektoren erläutert werden. Sie stellen die Erfordernisse dar, die eine Erfassungseinrichtung generell leisten können sollte. Der Fokus liegt im Folgenden daher zunächst auf der Allgemeingültigkeit dieser Anforderungen – d.h. die dort genannten Anforderungen gelten für sämtliche Detektoren gleichermaßen. Erst daran anschließend erfolgt die eingehende Betrachtung der Bluetooth-Technologie im Sinne ihrer spezifischen Anforderungserfüllung. Es ist dabei zu beachten, dass für die Untersuchung der Bluetooth-Technologie aus den genannten Anforderungen nur ein Teil der Qualitätskriterien als zugrundeliegende Bewertungsbasis extrahiert wird. Eine abschließende Einordnung der Bluetooth-Detektion im Vergleich zu herkömmlichen Detektionsarten rundet diese Betrachtungen ab.

4.2.1 Allgemeingültige Anforderungen an Detektoren

Die Qualität der Datenerfassung bestimmt entscheidend die Qualität der vorliegenden Daten und somit auch deren Aussagekraft hinsichtlich der Beschreibung des vorliegenden Verkehrsablaufs. Wie in Kapitel 2 bereits erläutert, erfolgt die Sicherstellung der gewünschten Qualität über die Einhaltung gewisser Anforderungen, die sich im Rahmen der Datenerhebung in speziellen Qualitätskriterien äußern. Die Anforderungen, die an Detektoren gestellt werden, lassen sich laut [FGSV91] in drei Kategorien unterteilen:

- Verkehrstechnische Anforderungen,

- Technische Anforderungen,
- Betriebliche Anforderungen.

Im Folgenden sollen die Inhalte dieser drei Anforderungskategorien näher erläutert werden. Es wird insbesondere auf die Qualitätskriterien und ihre Erscheinungsformen, die sich aus den Anforderungen ableiten, eingegangen und gezeigt, inwieweit die Wahl der Detektionseinrichtung die Qualität der Verkehrsdatenerfassung bestimmt. Eine zusammenfassende Übersicht der Anforderungskategorien mit den dazugehörigen Qualitätskriterien und deren Erscheinungsformen ist im Anlage C verfügbar.

Verkehrstechnische Anforderungen

Verkehrstechnische Forderungen beziehen sich auf die Fähigkeiten zur Erfassung von Verkehrskenngrößen, zur räumlichen und zeitlichen Differenzierung sowie auf die Unterscheidung von Verkehrs- und Fahrzeugeinheiten. Auch die Datenqualität selbst stellt hierbei ein wesentliches Qualitätskriterium dar, sodass die für die Datenqualität geltenden Qualitätskriterien rückwirkend auch Merkmale der Erfassungsqualität repräsentieren.

„Verkehrskenngrößen sind Beschreibungsgrößen für die Anwesenheit und das Bewegungsverhalten der Verkehrsteilnehmer“ und stehen als Grundinformationen der Detektoren direkt zur Verfügung oder sind aus ihnen ableitbar. Mit ihrer Hilfe lässt sich demnach das erfasste Verkehrsgeschehen rekonstruieren und bewerten. „Es ist [daher] anzustreben, mit ein und demselben Detektor mehrere Verkehrskenngrößen zu erfassen“ [FGSV91]. Das Merkblatt über Detektoren für den Straßenverkehr [FGSV91] benennt als Verkehrskenngrößen u.a.:

- Anwesenheit (An- und Abmeldung)
- Zeitlücke
- Belegungszeit
- Verkehrsstärke
- Reisezeit
- Wartezeit
- Reisegeschwindigkeit
- Anzahl der Halte.

Entscheidend für die Aussagekraft der Verkehrskenngrößen ist in besonderem Maße die Position der Messstellen. Die Position einer Messstelle ergibt sich je nach Ziel der Erfassung. Werden Detektoren im Zusammenhang mit Lichtsignalanlagen, z.B. zur Beurteilung der Fähigkeiten zur Bewältigung des Verkehrsaufkommens, installiert, bietet sich eine kreuzungsnaher Positionierung im Wartebereich der Zufahrten an. Hier können der Bedarf, Rückstaulängen, Vorrückvorgänge und Wartezeiten erfasst werden. Der Einsatz von Detektoren zur Beurteilung des Verkehrsablaufs auf Streckenabschnitten wiederum erfordert im Gegensatz dazu eine durch Kreuzungen möglichst unbeeinflusste Anbringung.

Die Nähe zum Kreuzungsbereich würde hier die Ergebnisse verfälschen und statt den tatsächlichen Verkehrsablauf der freien Strecke darzustellen, lediglich die Auswirkungen auf den Verkehr im Umkreis der Kreuzung widerspiegeln [SCHM10]. Die Erfassung der Verkehrskenngrößen kann entweder lokal oder streckenbezogen erfolgen, wobei die streckenbezogene Erfassung den Vorteil einer Beschreibung des Verkehrszustands im gesamten Streckenabschnitt bietet. Lokale Kenngrößen bilden den Verkehr nur punktuell ab und lassen somit nur schwer einen Rückschluss auf den weiteren Verkehrsfluss zu. Welche Kenngrößen die jeweiligen Detektoren erfassen können, hängt insbesondere auch von der Art der Messwerterfassung, ihren Charakteristiken und Eigenschaften ab, auf die bereits im Abschnitt 2.4 eingegangen wurde.

Die räumliche Differenzierung impliziert sowohl die getrennte Betrachtung der beiden Fahrrichtungen (richtungsgetrennte Erfassung) als auch die gesonderte Erfassung der einzelnen Fahrstreifen (fahrstreifengetrennte Erfassung). Dies kann sinnvoll sein, da die Verkehrsmenge in den unterschiedlichen Richtungen je nach Tageszeit, Wochentag und Monat variiert. Durch Berufspendler an den Werktagen, dem Freizeitverkehr an den Wochenenden und dem Urlaubsreiseverkehr in Schulferienzeiten verteilt sich der Verkehr auf einer Strecke in den beiden Richtungen asymmetrisch. Weitere Richtungsunterschiede ergeben sich durch Auswirkungen von Feiertagen, verkaufsoffenen Tagen oder auch aufgrund besonderer Verkehrsverhältnisse, die z.B. bei Großveranstaltungen sowie durch Straßensperrungen und Umleitungen hervorgerufen werden. Aufgrund der Asymmetrie erreicht „oft nur eine richtungsgetrennte Erfassung hinreichende Aussagekraft, aber auch Genauigkeit der Ergebnisse“ [FGSV10] für die reine Fahrzeugmengenerfassung und insbesondere auch für Geschwindigkeitskenngrößen. Die fahrstreifengetrennte Erfassung bietet wiederum den Vorteil, das Spurverhalten auf mehrstreifigen Richtungsfahrbahnen betrachten und darüber „Gesetzmäßigkeiten zwischen der Aufteilung der Fahrzeuge auf die einzelnen Spuren in Abhängigkeit von der Menge, Fahrzeugmischung, Geschwindigkeit und der Streckencharakteristik“ ableiten zu können. [FSST73]

Die Möglichkeiten der zeitlichen Differenzierung reichen von der Erfassung der einzelnen Fahrzeuge mit genauer zeitlicher Zuordnung des Einzelfahrzeugs bis hin zu deren zeitlicher Aggregation zu Minuten-, Stunden- oder Tageswerten. Gebräuchlich ist die Nutzung von 1-Stunden-Intervallen. Um kurzzeitige Spitzen näher untersuchen zu können, bieten sich jedoch auch feinere zeitliche Unterteilungen in 5-, 10- oder 15-Minuten-Intervalle an. Die Länge des Messintervalls hat durchaus einen gewissen Einfluss auf die Verkehrsdatenerfassung.

Die Differenzierung verschiedener Fahrzeugarten (Pkw, Lkw, Fahrrad) ist insofern von Bedeutung, als dass sich die Fahrzeuge z.B. hinsichtlich ihrer spezifischen Fahrdynamik, ihrer elektromagnetisch wirksamen Masse oder auch ihrer äußeren Gestalt voneinander unterscheiden. Die Fähigkeit einer Erfassungseinrichtung zur getrennten Betrachtung der verschiedenen Fahrzeugtypen gibt Aufschluss über die Verkehrsstärke sowie die Zusammensetzung und Verteilung von Kraftfahrzeugmengen und bietet damit Möglichkeiten

zur Ermittlung von Umweltbelastungen und darauf aufbauenden Planungen von Schutzmaßnahmen oder auch zur Bemessung der Fahrbahnbefestigung. [FGSV10], [EMVE91]

Die Datenqualität stellt selbst wiederum ein Qualitätskriterium der zu bewertenden Detektionseinrichtung dar. Ihre Erscheinungsformen wurden bereits in Abschnitt 2.5 erörtert. Die Frage, die sich demnach bei der Auswahl eines geeigneten Detektors stellt, ist, ob er die Fähigkeit besitzt, qualitativ hochwertige Daten, die ihrerseits durch gewisse Merkmale charakterisiert sind, hervorzubringen. Diese Fähigkeit besitzt der Detektor genau dann, wenn er wiederum selbst in der Lage ist, die an die Daten gestellten Anforderungen auch bei der Erfassung einzuhalten. Die sich daraus ergebenden Anforderungen werden unter der Kategorie der technischen Anforderungen zusammengefasst.

Technische Anforderungen

Die technischen Anforderungen entsprechen den allgemeingültigen Qualitätskriterien, die den im Qualitätskontext geltenden Normen zu entnehmen sind. Diese Qualitätskriterien beziehen sich einerseits insbesondere auf die Fähigkeit einer Erfassungseinrichtung, technisch den Erfordernissen der Datenerfassung zu genügen, andererseits existieren an vielen Stellen Überschneidungen hinsichtlich der für die Datenqualität geforderten Merkmale.

(1) Funktionalität

Die Funktionalität beschreibt, ob der Detektor in der Lage ist, entsprechend seines Verwendungszweckes, die an ihn gestellten Aufgaben zu erfüllen respektive die gewünschten Verkehrskenngrößen zu erfassen. Die Funktionalität ist demnach mit dem Begriff der Vollständigkeit gleich zu setzen anhand dessen geprüft werden kann, ob alle benötigten Kennwerte erhoben werden. Die Beurteilung der Vollständigkeit erfolgt je nach Verwendungszweck des Detektors, da die benötigten Kenngrößen entsprechend der gestellten Aufgabe variieren. Es ist daher darauf zu achten, welche Kriterien für die Fragestellung relevant sind. Der Begriff der Vollständigkeit kann darüber hinaus auch im Sinne des Datenumfanges gesehen werden. Der Umfang der erhobenen Daten bestimmt die Aussagefähigkeit und Repräsentativität der Ergebnisse: „Es ist offensichtlich, dass ein Messergebnis in der Regel umso besser bzw. repräsentativer ist, je länger und häufiger erhoben wurde, je größer also der Umfang der Stichprobe ist.“ [FGSV10], [FSST04]

(2) Zuverlässigkeit

Die Zuverlässigkeit bezieht sich dagegen auf die Verfügbarkeit der Daten und spiegelt somit die Korrektheit der Funktionen des Detektors wider. Die Verfügbarkeit der Daten wird durch die räumliche und zeitliche Konstanz der Datenerhebung ermöglicht. Die zeitliche Konstanz ist einerseits gegeben sofern ein stetiger Datenfluss vorliegt, andererseits bezieht sie sich auf die konstante Länge der Aggregationsintervalle. Die räumliche Konstanz wiederum stellt die Abdeckung des Untersuchungsgebietes mit Erfassungseinrichtungen dar. Bei Erfüllung dieser Voraussetzungen sind die gewünschten Daten verfügbar,

womit der Rückschluss auf die korrekte Funktionsweise der entsprechenden Erfassungseinrichtung gezogen werden kann. Die Zuverlässigkeit des Gerätes wird in diesem Fall als hoch eingestuft. Sind die Daten dagegen nicht verfügbar, also fehlen einzelne Daten oder auch ganze Datenblöcke, muss von einer Dysfunktion des Detektors ausgegangen werden und die Zuverlässigkeit sinkt entsprechend. Als Kriterium für die Zuverlässigkeit ergibt sich damit das Vorhandensein bzw. Nichtvorhandensein von Werten. Die Anforderungen an die Zuverlässigkeit variieren je nach der weiteren Verarbeitung der Daten – werden die erhobenen Daten beispielsweise online für die logikbasierte Steuerung einer Lichtsignalanlage verwendet, erfolgt keine Aggregation. Es müssen somit mehr Daten verfügbar sein, weshalb die geforderte Zuverlässigkeit bei den zum Einsatz kommenden Detektoren in diesem Fall bei 98 % liegt. Werden die Daten dagegen offline verwendet, genügt eine Zuverlässigkeit von 95 % (und nicht mehr als 10 aufeinander folgende fehlende Datensätze), da die Verwendung von Ausgleichsverfahren oder auch Messwertersetzungen eine gewisse Glättung bewirken und fehlende Werte somit weniger relevant sind. Die Länge der Aggregationsintervalle darf dabei nur um 0,1 % variieren. [LEHN05]

(3) Genauigkeit

Die Beurteilung der Genauigkeit der Datenerfassungseinrichtung manifestiert sich an der Genauigkeit der gesammelten Daten und entspricht daher, wie in Abschnitt 2.5 beschrieben, dem Grad der Übereinstimmung zwischen den erfassten Daten und einem die Realität widerspiegelnden Bezugsdatensatz. Dafür erfolgt ein „Vergleich der detektierten Daten mit einer vergleichbaren Datenreihe, die mit der Realität gleichgesetzt wird“ [LEHN05]. Vergleichbare Datenreihen entsprechen beispielsweise direkten Vergleichsmessungen, die parallel erfasst werden, oder auch historischen Ganglinien. Für Vergleichsmessungen werden entweder andere Referenzsysteme wie z.B. Radar und Video oder auch ein Vergleichssystem bestehend aus der gleichen Detektorart gewählt, die in geringem Abstand zueinander liegen.

(4) Zugänglichkeit

Unter dem Begriff der Zugänglichkeit wird sowohl die Benutzbarkeit des Systems, also dessen Benutzerfreundlichkeit im Hinblick auf die Bedienung, als auch die Möglichkeit zur Einsicht und zum Eingriff in das System (Änderbarkeit) verstanden. Die Änderbarkeit impliziert den zeitlichen, personellen und finanziellen Änderungsaufwand bei der Erkennung und Behebung von Fehlern. Für die Beurteilung der Zugänglichkeit ist entscheidend, dass „die Daten ohne größeren Aufwand eingesehen und weiterverarbeitet werden können“ [LEHN05]. Dies erfordert wiederum eine gewisse Datenhaltung, d.h. die Weiterleitung der erhobenen Daten an einen Zwischenspeicher oder optimalerweise an eine Datenbank. Für die Zugänglichkeit ist demnach relevant, ob und wie lange die Daten im jeweiligen Speichermedium gesammelt werden. Außerdem spielt das Datenformat, in dem die Daten abgespeichert werden, eine wichtige Rolle – die Verwendung eines im Allgemein gut (d.h. intuitiv) verständlichen Formats (z.B. BAST- oder ASCII-Format) ist aus

Gründen der Benutzerfreundlichkeit zu bevorzugen. Aber auch andere Datenformate wie z.B. die Ablage der Daten im Binär-Code sind möglich, erfordern jedoch zusätzliche Hinweise für deren Umwandlung sowie unterstützende Software. Die Einsichtmöglichkeit in die Daten ist insbesondere für die Überprüfung im laufenden Betrieb von Interesse. [FGSV10], [LEHN05]

Auch der Begriff der Übertragbarkeit spielt im Sinne der Zugänglichkeit eine Rolle. Die Übertragbarkeit impliziert die Anpassbarkeit, Portabilität und Skalierbarkeit eines Systems hinsichtlich der jeweiligen Aufgabenstellung und ist somit ein qualitativer Ausdruck für die Offenheit einer Datenerfassungseinrichtung im Hinblick auf Nutzung in verschiedenen Anwendungen. [FSST04]

(5) Aktualität

Die Aktualität betrachtet den Grad der zeitlichen Verfügbarkeit – neben der langfristigen Verfügbarkeit von Daten kann auch das zeitnahe bzw. rechtzeitige Vorliegen von Daten erforderlich sein. Um Ungenauigkeiten bei der Datenauswertung vorzubeugen, empfiehlt es sich bei der Datenhaltung, dass die erforderlichen Aggregationsintervalle eine Länge von bis zu 5 Minuten nicht überschreiten. [LEHN05]

(6) Plausibilität

Die Prüfung der Daten auf Plausibilität entspricht der Prüfung der Daten auf ihre Realitätsnähe, d.h. ob sie die Realität richtig abbilden. Ziel der Plausibilitätsprüfung soll es sein, mögliche Detektorstörungen und Geräteausfälle, Fehler bei den Datenübertragungen, aber auch Unregelmäßigkeiten im Verkehrsablauf (z.B. durch temporäre Bauarbeiten mit Fahrstreifensperrung während der Erhebung) zu erkennen, gegebenenfalls zu korrigieren oder fehlerhafte Daten zu löschen. „Hinweise auf mögliche Implausibilitäten liefern [...] externe Informationen über z.B. Baustellen, Sonderveranstaltungen, Umleitungen oder Hilfsgrößen, die aus den Daten selbst abgeleitet werden.“ Als Hilfsgrößen dienen beispielsweise Schwellenwerte einzelner Stundenwerte oder auch Stundengruppen am Tagesverkehr, die Standardabweichung der Einzelwerte, deren Variationsbreite oder Geschwindigkeitskennwerte. [FGSV10]

(7) Effizienz

Als Effizienz wird generell das Verhältnis zwischen dem erreichten Ergebnis und den eingesetzten Ressourcen verstanden [EISO05]. Bezogen auf die Qualität einer Datenerfassungseinrichtung äußert sich die Effizienz im zeitlichen Verhalten und dem Ressourcenverbrauch der Funktionen. Für die Beurteilung der Effizienz werden daher quantifizierbare Größen wie Latenzzeiten (Verzögerungs- bzw. Reaktionszeiten) oder auch der benötigte Speicherbedarf herangezogen. [FSST04]

Betriebliche Anforderungen

Die betrieblichen Anforderungen an Detektoren beziehen sich insbesondere auf deren Inbetriebnahme und Einsatz. So können sowohl der Eingriff in den Verkehrsablauf bei der baulichen Anordnung und dem gerätetechnischen Aufbau (Montage) als auch der Aufwand für Wartung und Instandhaltung von besonderer Bedeutung für die qualitative Beurteilung einer Erfassungseinrichtung sein. Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen und die Erfüllung geltender Vorschriften spielen ebenfalls eine Rolle.

Je nach Einsatzzweck und örtlicher Gegebenheit können Detektoren in verschiedenen Positionen im Straßenraum angeordnet werden. Systembedingt erlauben Sensoren eine Installation auf, über und neben sowie in bzw. unter der Fahrbahn. Die Abbildung 16 verdeutlicht die verschiedenen Positionierungsmöglichkeiten. [FGSV10]

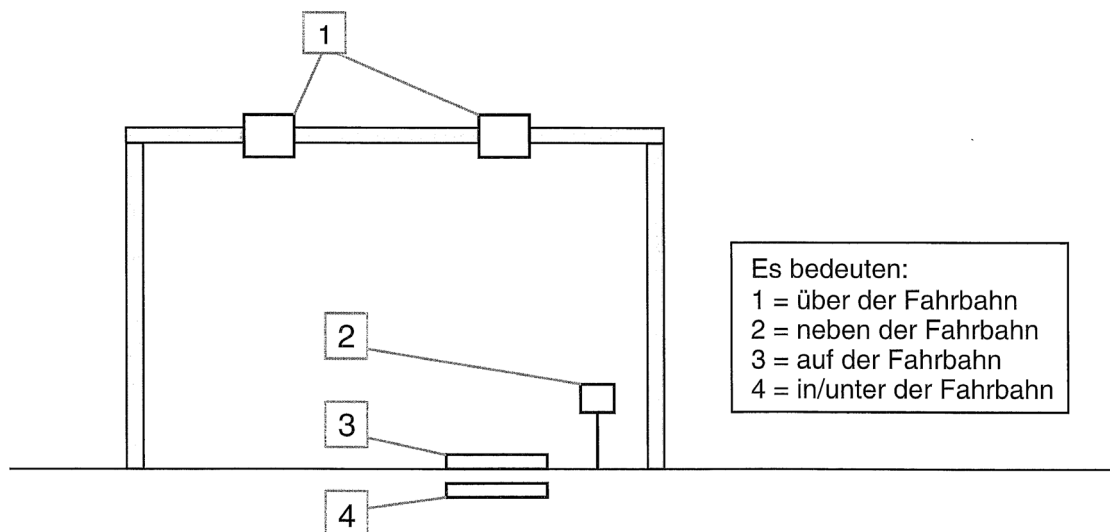


Abbildung 16: Positionen von Detektoren im Straßenraum [FGSV 10]

Der Vorteil bei der Anbringung der Detektoren über oder seitlich neben der Fahrbahn besteht darin, dass die Fahrbahndecke von den Montagearbeiten unberührt und der Verkehrsfluss im Gegensatz zur Montage in oder auf der Fahrbahn weitestgehend unbeeinträchtigt bleibt. Neben dem notwendigen Eingriff in den Verkehr und dem Aufwand, der sich aus der Montage der jeweiligen Detektoren ergibt, hat die Positionierung in Verbindung mit dem zugrunde liegenden physikalischen Messprinzip auch Auswirkungen auf die Genauigkeit der Datenerfassung: „Je nach Positionierung ergeben sich daraus abweichende Erfassungsgrößen und -genauigkeiten, insbesondere bei Sensoren, die mehrere Fahrstreifen abdecken“ [FGSV06]. Bei Detektoren in Seitenaufstellung kann es beispielsweise zu Abschattungseffekten kommen, sodass niedrige Fahrzeuge hinter hohen Fahrzeugen nicht zu erkennen sind. Erfassungslücken sind je nach Breite des Detektionsfeldes auch im Bereich von Fahrbahnmarkierungen bei mehrstreifigen Fahrbahnen möglich. Motorräder und sehr schmale Pkw können hier unter Umständen nicht detek-

tiert werden. Genauso sind Doppel- oder Mehrfachzählungen bei Fahrstreifenwechsel oder bei Fahrzeugen mit Anhänger (insbesondere Lkw mit Anhänger) möglich. [FGSV06]

Bei der Positionierung von Verkehrsdetektoren ist zudem zu beachten, dass der Erfassungsbereich möglichst frei von beeinflussenden Faktoren ist. Der einsehbare Bereich spielt eine entscheidende Rolle für die Erkennbarkeit der Verkehrsteilnehmer. „Überdeckungen durch in den Sichtbereich hereinragende Gegenstände (Bäume, Pflanzen, Häuser, Lichtmasten o.ä.) sind daher bei der Installation auszuschließen.“ [SCHM10]

In verschiedenen Untersuchungen zur automatischen Erfassung von Verkehrsdaten [FSST73] wurde die Funktionstüchtigkeit von Detektoren unter verschiedenen Bedingungen beobachtet. Bei bestimmten Detektoren ergaben sich hierbei Probleme mit der Temperaturstabilität, sodass z.B. bei starker Sonneneinstrahlung Störungen auftraten. Es ist daher wünschenswert, dass Detektoren eine geringe Störanfälligkeit bzw. hohe Ausfallsicherheit gegenüber äußeren Einflüssen (z.B. Beanspruchung durch Fahrzeuge, aber auch Witterung, Schmutz, Erschütterungen) besitzen. Die durchzuführenden Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten richten sich nach der baulichen Anordnung – um etwaige Eingriffe in das Verkehrsgeschehen bei Störungen oder Defekten dennoch zu minimieren, erleichtert eine einfache Montage die Reparatur bzw. den Austausch von Komponenten und beugt weiteren Beeinträchtigungen des Verkehrsflusses vor. Generell sollten Erfassungsgeräte möglichst wartungsarm bzw. wartungsfrei sein. [FGSV91]

Der Aufwand für die Inbetriebnahme und die Instandhaltung der Erfassungsgeräte spiegelt sich einerseits im Arbeitsaufwand wider, andererseits aber auch in den Kosten für die Anschaffung und den Betrieb. Ein weiteres Kriterium für die Wahl einer Erfassungseinrichtung stellen somit die Gesamtkosten dar, die sich aus den Investitionskosten sowie den laufenden Kosten zusammensetzen und anhand derer sich die Wirtschaftlichkeit des Gerätes abschätzen lässt. Die Investitionskosten fallen einmalig für den Kauf, die Montage und die Anpassung des Systems an die Erfordernisse vor Ort an. Die laufenden Kosten beziehen sich auf die während des Betriebs anfallenden Kosten für die Messung, Wartungs- und Reparaturarbeiten. Die Betrachtung der Gesamtkosten als Entscheidungskriterium hat insbesondere Gewicht bei zeitlich begrenzten Erhebungen. So werden Induktionsschleifen wegen der relativ hohen Kosten für die Verlegung vorwiegend für den stationären Einsatz (z.B. bei Dauermessstellen, an Lichtsignalanlagen) gewählt. In der Praxis gilt daher bei der qualitativen Bewertung von Verkehrsdetektoren, dass aus finanzieller Sicht ein Erfassungssystem mit geringen Kosten für Tiefbau- und Installationsarbeiten zu bevorzugen ist. [BAUM08], [FGSV10]

Neben baulichen und wirtschaftlichen Faktoren sind auch rechtliche Aspekte zu berücksichtigen. Für die Anbringung und Nutzung entsprechender Verkehrserfassungseinrichtungen existieren Vorschriften und Normen, in denen beispielsweise datenschutzrechtliche und sicherheitstechnische Belange verankert sind.

Bei der Aufnahme der Verkehrsabläufe werden neben dem reinen Bewegungsvorgang teilweise auch individuelle Daten der beobachteten Verkehrsteilnehmer erhoben. Zählungen mittels Induktivschleifendetektoren oder Fahrzeugerkennungen auf Basis von Strahlungsfeld-Dektoren lassen im Allgemeinen keinen Bezug zu einer bestimmten Person zu und sind daher datenschutzrechtlich nicht relevant. Anders verhält es sich bei Verkehrserhebungen über Bild-Dektoren (Videokameras), die das Verkehrsgeschehen aufzeichnen und auf deren Bildmaterial teilweise Merkmale der Personen selbst oder auch Daten mit Personenbezug, die eine Zuordnung zu einer bestimmten Person erlauben, enthalten sind: „Für die Datenschutzrelevanz ist [...] entscheidend, ob die erhobenen Daten (z.B. Daten mit dem Merkmal ‚Kfz-Kennzeichen‘) bei Benutzung weiterer Informationen (z.B. Kfz-Halter-Datei) auf bestimmte Personen bezogen werden können“ [FGSV86]. Daher sind alle personenbezogenen Daten, die Rückschlüsse auf spezielle Personen zu lassen, schutzwürdige Daten – ihre Erfassung und Nutzung fallen dementsprechend unter das geltende Datenschutzgesetz. Für die Sicherung der Daten sind bei der Erhebung personenbezogener Daten diesbezüglich insbesondere die vier Phasen der Datenverarbeitung (Speichern, Übermitteln, Verändern, Löschen) von Bedeutung. Die Datensicherung umfasst alle technischen und organisatorischen Maßnahmen, die erforderlich sind, um die Einhaltung der Vorschriften der Datenschutzgesetze sicherzustellen. Eine Möglichkeit zur Sicherstellung des Datenschutzes bietet die Anonymisierung: „Wird der Personenbezug bzw. die Möglichkeit zu einem Personenbezug (Bestimmbarkeit) eliminiert, so handelt es sich um anonymisierte Daten, die nicht mehr unter die Vorschriften des Datenschutzgesetzes fallen“ [FGSV86]. Ein personenbezogenes Datum gilt dann als wirksam anonymisiert, „wenn der Aufwand für eine mögliche Deanonymisierung in keinem vernünftigen Verhältnis zu dem Informationswert steht, den man durch die Deanonymisierung erreichen würde“ [FGSV86].

Für die Montage einiger Verkehrserfassungseinrichtungen besteht, wie bereits zuvor erläutert, aufgrund ihrer baulichen Anordnung die Notwendigkeit eines Eingriffes in den Straßenraum bzw. das Verkehrsgeschehen. Die Zuständig für die Durchführung solcher Maßnahmen liegt beim zuständigen Straßenbaulastträger und den Straßenverkehrsbehörden, bei denen daher zunächst eine Genehmigung für den entsprechenden Eingriff einzuholen ist. Kann der Eingriff schließlich erfolgen, bestehen Sicherheitsvorschriften, die es zu beachten und einzuhalten gilt. So sind z.B. „bei Montagearbeiten an Brückengeländern oder Auslegermasten Fahrbahnsperren oder Sicherungen erforderlich [...], um Unfälle durch herab fallendes Werkzeug oder Montagmaterial zu verhindern.“ Die aus den erforderlichen Sicherheitsmaßnahmen entstehenden Kosten sind bei der Auswahl des Messsystems ebenfalls zu berücksichtigen. [FGSV10]

4.2.2 Ableitung von Qualitätskriterien als Bewertungsgrundlage

Aus der Fülle an bestehenden Anforderungen beschränkt sich diese Arbeit bei der Bewertung der Bluetooth-Technologie im Sinne der Eignung für die Verkehrslageerfassung auf folgende Qualitätskriterien:

- Datenerfassung
- Handhabung
- Wirtschaftlichkeit
- Einsatzbereich

Die Betrachtung der Datenerfassung impliziert die Art und Weise, wie Verkehrsdaten durch den jeweiligen Detektor erfasst werden. Im Fokus der Betrachtung steht hierbei insbesondere die Fähigkeit des Systems, zwischen verschiedenen Fahrzeugklassen zu unterscheiden, die Fahrtrichtung und einzelne Fahrstreifen getrennt zu erfassen und verkehrstechnische Kenngrößen wie beispielweise Zeitlücken, Verkehrsstärken, Geschwindigkeiten und Belegungszeiten oder die Anwesenheit von Fahrzeugen zu bestimmen.

Bei der Handhabung wird auf den Aspekt des Aufwandes für Montage- und Wartungsarbeiten eingegangen. Die Anbringung kann im Straßenraum an verschiedenen Stellen mit mehr oder weniger großem Aufwand für die Handhabung erfolgen – es sollen daher an dieser Stelle die unterschiedlichen Anbringungsmöglichkeiten sowie deren Vor- und Nachteile für die Erfassungseinrichtung dargestellt werden.

Die Wirtschaftlichkeit wird aus Sicht der Kosten für Neuanschaffung, Montage und Unterhalt des Systems untersucht. Der Fokus liegt hier auf den Kosten für die Anschaffung entsprechender technischer Komponenten sowie für Installations- und Tiefbauarbeiten.

Der Einsatzbereich ist insofern für die Betrachtungen relevant, als dass dieser und die zuvor genannten Kriterien in einer gewissen Abhängigkeit zueinander stehen. So richtet sich einerseits der Einsatzbereich nach den spezifischen systembedingten Eigenschaften des Detektors selbst, andererseits verlangt ein spezieller Einsatzort auch die Erfüllung bestimmter Anforderungen, die es mittels eines Detektors abzudecken gilt. Die benötigte Ausstattung wirkt sich zudem auf die Kosten und somit auf die Wirtschaftlichkeit des Detektors aus. Für die Beurteilung möglicher Einsatzbereiche fließen hier folgende Untersuchungsaspekte ein: Art der Verkehrsanlage, auszustattende Streckenlänge, Größe des zu beeinflussenden Netzes, Knotenpunkt- und Messquerschnittsgrößen.

Die Auswahl dieser Kriterien erfolgte in Anlehnung an [BAUM08], die sich mit einer vergleichenden Bewertung gängiger Detektorarten im Straßenverkehr auseinandersetzt und somit eine geeignete Vergleichsbasis für die Bewertung von Bluetooth gegenüber anderen Detektoren bietet.

4.2.3 Bewertung der Bluetooth-Technologie für den Einsatz als Detektor

Im Folgenden wird die Bluetooth-Technologie entsprechend der zuvor genannten Qualitätskriterien auf ihre Eignung hinsichtlich der Verwendung als Verkehrserfassungseinrichtung überprüft. Anhand recherchierter Quellen wird die Erfüllung der Kriterien sowie der dazugehörigen Anforderungen durch die Bluetooth-Technologie diskutiert und soweit vorhanden mit Beispielen bereits durchgeführter Untersuchungen unterlegt.

Datenerfassung

Fahrtrichtung/Fahrstreifen

Die Fähigkeit eines Detektors zur Trennung von Fahrtrichtung und einzelnen Fahrstreifen erlaubt, die Asymmetrie des Verkehrs in Richtung und Gegenrichtung sowie bei mehrstreifigen Richtungsfahrbahnen zu unterschiedlichen Tageszeiten, Wochentagen und Monaten zu erheben. Eine solch differenzierte Erfassung ermöglicht wiederum eine erhöhte Aussagekraft der Verkehrsdaten und bewirkt damit auch die Verbesserung der Genauigkeit der Ergebnisse. [FGSV10]

Da Bluetooth selbst in der geringsten Leistungsklasse einen Bereich von einigen Metern abdeckt, erfasst ein Detektor auf Bluetoothbasis entsprechend über mehrere Fahrspuren und in beide Richtungen. Dies ist einerseits ein Vorteil, da so weniger Messstellen benötigt werden. Andererseits ist damit eine richtungs- bzw. fahrstreifenbezogene Erfassung kaum bis überhaupt nicht möglich. Für die Richtungstrennung kann die Ermittlung der Fahrtrichtung unter zu Hilfenahme mehrerer Detektionseinrichtungen realisiert werden. Hierbei ist wichtig, dass ein Fahrzeug bzw. die MAC-Adresse des darin befindlichen, aktivierten Bluetooth-Gerätes an zwei oder mehreren Messstationen wiedererkannt wird. Bei der Fusion der Datensätze der verschiedenen Detektoren kann dann anhand der zeitlichen Abfolge der Erkennung die Reihenfolge der passierten Erfassungseinrichtungen nachvollzogen und somit die Richtung, in die sich dieses Fahrzeug bewegt hat, abgeleitet werden. Eine Richtungstrennung ist auch dann möglich, wenn z.B. auf Autobahnen beide Richtungen durch einen sehr breiten Mittelstreifen voneinander getrennt sind, sodass sich die durch die Bluetooth-Detektoren abgedeckten Erfassungsbereiche nicht überlappen.

Eine fahrstreifendifferenzierte Erfassung ist hingegen nach derzeitigem Wissensstand nicht realisierbar: „[...] lane by lane data is not available using this technology [...]“. [HAGH10]

Fahrzeugklassen

Unter der Differenzierung von Fahrzeugklassen wird die Fähigkeit eines Detektors verstanden, die verschiedenen, am Verkehr teilnehmenden Fahrzeugtypen voneinander zu unterscheiden. Gemäß den technischen Lieferbedingungen für Streckenstationen (TLS) [BAST02] lassen sich die in Tabelle 5 dargestellten Fahrzeugklassen differenzieren.

Tabelle 5: TLS-Fahrzeugklassifizierung nach [FGSV10]

Klassifizierungsgruppen			
1	2	5 + 1	8 + 1
Kfz	Pkw-ähnlich	nicht klassifizierbare Kfz	nicht klassifizierbare Kfz
		Pkw-Gruppe	Motorrad
			Pkw
	Lkw-ähnlich	Pkw mit Anhänger	Pkw mit Anhänger
		Lkw > 3,5 t ohne Anhänger	Lkw > 3,5 t ohne Anhänger
		Lkw > 3,5 t mit Anhänger / Sattelzug	Lkw > 3,5 t mit Anhänger
			Sattelzug
	Bus	Bus	

Aufgrund der reinen Erfassung der MAC-Adresse eines bluetoothfähigen Gerätes innerhalb des zu detektierenden Fahrzeuges liegt keine direkte Möglichkeit zur Differenzierung verschiedener Fahrzeugklassen mittels Bluetooth vor. Die mobilen Geräte, die zum großen Teil die Basis für die Detektion mit Bluetooth bilden, sind in der Regel unabhängig vom Fahrzeug und somit auch vom Fahrzeugtyp. Darüber hinaus kann nicht pauschal davon ausgegangen werden, dass es sich bei der erfassten MAC-Adresse tatsächlich um ein in einem Fahrzeug befindliches Gerät gehandelt hat. Bluetooth-fähige Geräte können auch von Fußgängern oder Fahrradfahrern mitgeführt und daher ebenfalls über den Bluetooth-Detektor erfasst werden sofern sie sich innerhalb des Empfangsradius aufhalten. Eine Filterung der entsprechenden Datensätze kann beispielsweise auf Basis der Geschwindigkeit stattfinden, da sich sowohl Fußgänger als auch Fahrradfahrer zumeist langsamer fortbewegen als motorisierte Verkehrsteilnehmer. Kritisch wird diese Herangehensweise jedoch in Kreuzungs- und anderen Staubereichen, in denen auch die Geschwindigkeiten des motorisierten Verkehrs abnehmen bzw. teilweise sogar geringer ausfallen als die der nicht-motorisierten Teilnehmer. Auch die Unterscheidung zwischen dem motorisierten Individualverkehr und dem Öffentlichen Verkehr (z.B. Busse und Straßenbahnen) ist in dem diesem Zusammenhang als problematisch einzustufen. Der ÖV kann aufgrund der Zwischenhalte an Haltestellen in seinem Verhalten und seinen Reisezeiten nicht unbedingt mit dem restlichen Verkehr gleichgesetzt werden. Befinden sich zudem innerhalb des Öffentlichen Verkehrsmittels mehrere Personen mit Bluetooth-fähigen Geräten bildet die Erfassung dieser MAC-Adressen eine Lastenmenge ab, die in Realität nicht mit dem tatsächlichen Verkehrsaufkommen gleichzusetzen ist. Dies kann zwar einerseits als möglicher Indikator für die Installation einer Bevorrechtigungsschaltung für den ÖV genutzt werden. Andererseits erscheint es nach derzeitigem Stand der Technik sinnvoll, bei der Auswahl der Messstandorte sowie bei der Auswertung der erhobenen Datensätze zunächst darauf zu achten, dass das Vorhandensein und die Menge

des Fußgänger- und Radverkehrsaufkommens sowie des Öffentlichen Verkehrs möglichst minimal sind, da ansonsten mit einer Verfälschung der Reisezeitergebnisse des MIV, verursacht durch die fehlende Zuordnung der detektierten Bluetooth-Geräte zu den einzelnen Verkehrsarten, zu rechnen ist: „In Straßenzügen mit mehreren Verkehrsarten (Fußgänger, Radfahrer, ÖPNV, MIV) kann die Reisezeitermittlung bei fehlender Zuordnung der Bluetooth-Geräte zu den Verkehrsarten unbrauchbar sein. Dies trifft insbesondere auf Stausituationen zu, in denen die erwarteten Geschwindigkeitsniveaus der einzelnen Verkehrsarten nicht mehr zutreffen müssen“ [HOYE11]. Zu empfehlen ist daher die Anbringung der Bluetooth-Detektoren an Einsatzorten, an denen der Einfluss des nicht-motorisierten Individualverkehrs sowie die Auswirkungen des Öffentlichen Verkehrs möglichst gering sind.

Unabhängig davon ist jedoch unter bestimmten Rahmenbedingungen dennoch ein Rückschluss auf den Fahrzeugtyp des MIV möglich. So kann laut [WEIN11] beispielsweise auf Autobahnen eine Unterscheidung zwischen Pkw- und Lkw-Verkehr anhand der verschiedenen Durchschnittsfahrzeiten bei Normalverkehr erfolgen. Eine Klassifizierung der Bluetooth-Adressen nach Pkw/Lkw könnte somit „über mehrere Beobachtungsabschnitte mit Bezug auf die errechnete Reisezeit erfolgen.“ Eine weitere Möglichkeit zur Fahrzeugdifferenzierung ergibt sich aus dem aufgenommenen Datensatz – dieser kann neben dem Zeitstempel und der MAC-Adresse zusätzlich auch den Namen des erfassten Gerätes beinhalten. Teilweise stellen diese Namen eindeutige Gerätebezeichnungen mit firmenbezogenen Kennungen dar, wie es z.B. bei Navigationsgeräten der Firma TomTom [TOMT11] der Fall ist – bei der Erfassung eines solchen Navigationsgerätes mit aktivierter Bluetooth-Schnittstelle kann in den meisten Fällen von einer privaten Nutzung und somit von der Detektion eines Pkw ausgegangen werden. Es jedoch zu beachten, dass all diese Herangehensweisen keine sichere Lösung darstellen, sodass Bluetooth bei der Fahrzeugklassen-Differenzierung als ungeeignet einzustufen ist.

Kenngößen (außerstädtisch)

Die Erfassung von Kenngrößen richtet sich insbesondere nach der Art der Verkehrsanlage und deren spezifischen Anforderungen an die benötigte Datenbasis zur Beurteilung der aktuellen Verkehrssituation bzw. für den Eingriff in das Verkehrsgeschehen zu Steuerungszwecken. So kristallisieren sich bereits bei der Unterscheidung zwischen außer- und innerstädtischem Netz erhebliche Unterschiede in den Anforderungen an die zu erhebenden Kenngrößen heraus.

Die TLS [BAST02] geben beispielsweise für außerstädtische Netze Kenngrößen zur Beurteilung der Erfassungsgenauigkeit der Detektionseinrichtungen vor, die hinsichtlich der aktuellen Verkehrssituation als Kurzzeitdaten bzw. für statistische Zwecke als Langzeitdaten erfasst werden sollen. Diese Kenngrößen beziehen sich vor allem auf die Messgenauigkeit bei der Erfassung der Kfz- und Lkw-Verkehrsmengen sowie auf Angaben zu

Fahrzeuggeschwindigkeiten, um den Verkehrsfluss bzw. kapazitative Engpässe zu überwachen. Es wird daher gefordert, folgende Kenngrößen zu erheben [BAST02]:

- Verkehrsstärke
- Geschwindigkeit
- Fahrzeugklassifizierung

(1) Verkehrsstärke

Die Messung der Verkehrsstärke mit Bluetooth entspricht einer Schätzung. Da nur ein geringer Teil der Fahrzeuge mit aktivierten Bluetooth-Geräten bestückt ist, kann lediglich ein gewisser prozentualer Anteil aller am Verkehr teilnehmenden Fahrzeuge erfasst werden. Untersuchungen der University of Maryland aus dem Jahre 2008 ergaben diesbezüglich, dass etwa eines von zwanzig Fahrzeugen ein detektierbares, aktiviertes Bluetooth-Gerät enthält [MARY08]. Es kann jedoch heutigen Tages von einem höherem Anteil ausgegangen werden, da aufgrund der in den letzten Jahren stetig angewachsenen Verbreitung von Bluetooth in Mobiltelefonen sowie in weiteren mobilen Geräten auch die Anzahl detektierbarer Geräte angestiegen ist.

Die Erkennungsrate von Fahrzeugen mit bluetoothfähigen Geräten ist jedoch nicht nur abhängig von der verfügbaren Anzahl detektierbarer Geräte. Die Erkennung von Geräten ist vielmehr in besonderem Maße von der Geschwindigkeit des zu erfassenden Fahrzeuges abhängig. Aufgrund des bei Bluetooth zugrunde liegenden Frequenzsprungverfahrens, bei dem ein schneller Wechsel zwischen 79 vorhandenen Frequenzen stattfindet, kann das Finden eines Bluetoothgerätes in der Praxis etwa 10 Sekunden in Anspruch nehmen. Im extremen Fall kann ein vollständiges Abhören aller Frequenzen notwendig sein, um ein in Reichweite befindliches Gerät zu erkennen. Der Zeitbedarf für das Abhören der Frequenzen und die begrenzte Funkreichweite beeinflussen das Suchen und Finden bluetoothfähiger Geräte maßgeblich. Betrachtet man den prinzipiellen Aufbau einer Bluetoothdetektion (siehe Abbildung 17), so wird klar, dass der durch die Reichweite der Detektionseinrichtung vorgegebene räumliche Erfassungsbereich und der Zeitbedarf für das Finden eines Gerätes in engem Zusammenhang mit der Geschwindigkeit des zu detektierenden Fahrzeuges stehen. Je langsamer sich das zu erfassende Fahrzeug bewegt, desto länger befindet es sich innerhalb des Erfassungsbereichs und desto mehr Zeit steht für die Erkennung zur Verfügung – die Wahrscheinlichkeit einer Erkennung steigt somit mit sinkender Geschwindigkeit. Bei höheren Geschwindigkeiten kann hingegen ein Teil der vorbeifahrenden Fahrzeuge mit aktiviertem Bluetoothgerät übersehen werden. Eine hundertprozentig sichere Erkennung mit Bluetooth ist somit nicht vorausgesetzt. [HOYE11]

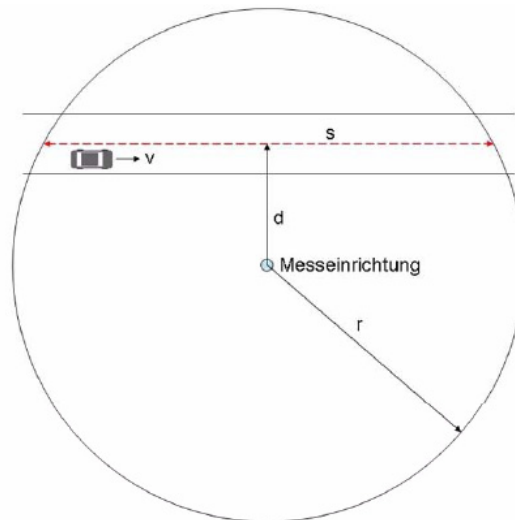


Abbildung 17: Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit eines Fahrzeuges und dem Erfassungsradius eines Bluetooth-Detektors [HOYE11]

Entsprechend der Abbildung 17 ergibt sich bei gegebenem Erfassungsradius r' der Detektionseinheit sowie dem Abstand d' der Erfassungstechnik von der Fahrbahn unter der Bedingung, dass dieser Abstand kleiner oder maximal gleich dem Erfassungsradius ist, eine bestimmte Wegstrecke s' , die ein Kfz mit detektierbarem Bluetoothgerät innerhalb des Erkennungsbereichs der Erfassungseinrichtung zurücklegt. Je nachdem mit welcher Geschwindigkeit v' sich das Fahrzeug fortbewegt, wird eine gewisse Durchfahrtszeit t_D' benötigt. Diese Durchfahrtszeit ist gleichzusetzen mit der zur Verfügung stehenden Zeit für die Erkennung des Bluetoothgerätes und somit des entsprechenden Fahrzeuges. Mit Hilfe folgender formaler Zusammenhänge ist es darauf aufbauend möglich, die bei einer als konstant angenommenen, spezifischen Geschwindigkeit verfügbare Erkennungszeit zu ermitteln bzw. im Umkehrschluss auch die Geschwindigkeit zu bestimmen, mit der sich ein Fahrzeug bewegen müsste, um eine nahezu sichere Erkennung zu gewährleisten. [HOYE11]

Nach [HOYE11] wird die Berechnung der verfügbaren Zeit zur Fahrzeugerkennung entsprechend Formel 2, Formel 3 und Formel 4 hergeleitet. Bei der Berechnung gelten die Annahmen: $v = const$; $r = const$; $d \leq r$.

I:

$$v = \frac{s}{t}$$

$$\rightarrow t_D = \frac{s}{v}$$

Formel 2

$$\text{II:} \quad r^2 = d^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2$$
$$\rightarrow s = 2 \cdot \sqrt{r^2 - d^2}$$

Formel 3

$$\text{II in I:} \quad t_D = \frac{2 \cdot \sqrt{r^2 - d^2}}{v}$$

Formel 4

wobei

- v = Geschwindigkeit des Kfz
- s = Wegstrecke des Kfz durch den Erkennungsbereich der Erfassungseinrichtung
- r = Erfassungsradius der Messeinrichtung
- d = Entfernung der Erfassungstechnik von der Fahrbahn
- t_D = Durchfahrzeit des Erkennungsbereichs (verfügbare Zeit für die Erkennung)

Aus Formel 4 leitet sich ab: Je größer die Entfernung ,d' der Messeinrichtung von der Fahrbahn wird, umso stärker verringert sich die Zeit zur Erkennung vorbeifahrender Geräte mit aktivierter Bluetooth-Schnittstelle.

Anhand der gegebenen Formeln zeigt sich, wie knapp bemessen die zur Verfügung stehende Zeit zur Erfassung eines Bluetooth-fähigen Gerätes tatsächlich ist bzw. mit welcher Geschwindigkeit ein Fahrzeug entsprechend fahren dürfte, um mit einer gewissen Sicherheit auch wirklich erkannt zu werden. So ergibt sich beispielsweise unter der Annahme, dass sich ein Fahrzeug mit einer Geschwindigkeit von 50 km/h bewegt und der Detektor mit einem Erfassungsradius von 20 m (entspricht Bluetooth Klasse 2) bei gleichzeitigem Abstand von 5 m zur Fahrbahn installiert ist, dass der mögliche Zeitraum für die Erfassung nicht mal 3 Sekunden beträgt. Geht man dagegen davon aus, dass ein möglicher Erfassungszeitraum von 10 Sekunden eingehalten werden soll und der Detektor unverändert zum ersten Beispiel angebracht ist, dürfte sich das Fahrzeug nur mit gerade mal 14 km/h fortbewegen, um eine halbwegs sichere Detektion zu garantieren. Da üblicherweise höhere Geschwindigkeiten im Straßenverkehr gefahren werden, sinkt die Erkennungsrate aufgrund dessen zusätzlich. Lösungsansätze für die Problematik der Erfassungszeit werden insbesondere in der Verkürzung der Inquiry-Zeiten beispielsweise durch parallele Nutzung mehrerer Detektoren zur gleichzeitigen Abdeckung verschiedener Frequenzen gesehen. [CCOM06]

Da aufgrund der genannten Zusammenhänge nicht jedes detektierbare Gerät von einer Erfassungseinrichtung erkannt wird, ist die erreichbare Anzahl an Detektionen gegenüber den tatsächlich vorhandenen Geräten dementsprechend geringer. Betrachtet man die

erzielbaren Erkennungsraten anderer Untersuchungen, so schwanken deren Ergebnisse hinsichtlich des prozentualen Anteils an erfassten Bluetooth-Geräten innerhalb des Gesamtverkehrs sehr stark. Im Rahmen eines Forschungsprojektes zu Einsatzmöglichkeiten und der Anwendbarkeit von BLIDS Network Sensoren der Firma c.c.com GmbH im Jahre 2010 erfasste Stichproben zeigten immerhin „eine Quote von 20-30% der Grundgesamtheit bezogen auf den gesamten Straßenverkehr“ [WEIN11]. Andere Untersuchungen erreichten hingegen lediglich Erkennungsraten von 5-10% [BREN09]. Eine weitere aktuelle Untersuchung aus dem Jahr 2010 der Universität Kassel zeigt ebenfalls eine sehr starke Streuung der Erkennungsraten: „Die Erkennungsrate streute zwischen den verschiedenen Standortregionen zwischen 3% und 20% der Verkehrsstärke und somit überaus stark“ [HOYE11].

Eine teilweise sehr genaue Schätzung der Verkehrslage ist mit diesen Prozentzahlen dennoch möglich. Voraussetzung dafür ist eine hinreichend hohe Grundgesamtheit an vorhandenen Fahrzeugen – in [TARN08] wird hierfür eine Mindestverkehrsmenge von 600 Fahrzeugen pro Stunde benannt, um bei einer Erfassungsrate von 5-7% (pro Tag) mittels Bluetooth ein adäquates Ergebnis bei der Verkehrslageerfassung zu erzielen. Vergleicht man die Erkennungsquote von Bluetooth zudem mit anderen, alternativen Detektionseinrichtungen wie beispielsweise Floating Car Data (FCD) oder der Erfassung mittels GPS, so lässt sich zwar einerseits laut [TARN08] anhand der Aussagen der erfassten Daten eine gute Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen der drei Erfassungsmethoden feststellen. Andererseits sind die Daten aus der Erhebung mittels Bluetooth gegenüber FCD- und GPS-Erfassung dennoch als statistisch verlässlicher einzustufen, da Bluetooth wesentlich mehr Datenpunkte liefert.

(2) Geschwindigkeit

Die Messung der Geschwindigkeit mittels Bluetooth erfolgt über die Wiedererkennung der MAC-Adresse. Wird ein Fahrzeug von einer anderen Detektionseinrichtung ebenfalls erkannt, kann bei bekanntem Abstand zwischen beiden Messstellen und der Zeitdifferenz zwischen der Erkennung an Station 1 bzw. Wiedererkennung an Station 2 die gefahrene Geschwindigkeit innerhalb des betrachteten Abschnittes näherungsweise ermittelt werden. Eine weitere, jedoch stark fehleranfällige Möglichkeit zur Bestimmung der Geschwindigkeit besteht in der Nutzung eines einzigen Detektors. Dafür wird bei mehrmaliger Erfassung des Fahrzeugs durch einen einzelnen Detektor die Differenz aus dem Zeitpunkt der ersten und dem Zeitpunkt der letzten Erfassung gebildet. Es wird dann davon ausgegangen, dass sich das erfasste Fahrzeug genau so lange innerhalb des Erfassungsradius aufgehalten hat, wie es die so bestimmte Zeitspanne vorgibt. Das bedeutet, dass der erste Zeitstempel als Eintrittszeitpunkt und der letzte Zeitstempel als Austrittszeitpunkt aus dem Bereich der Erfassung gewertet wird. Die zurückgelegte Strecke würde in diesem Fall dem Durchmesser des Erfassungsbereiches entsprechen. Aus dieser Weglänge und der dafür benötigten Reisezeit kann somit ebenfalls die Geschwindigkeit des Fahrzeuges bestimmt werden. Die Fehleranfälligkeit dieses Verfahrens beruht insbeson-

dere darin, dass die erste Erfassung nicht zwingend mit dem Eintritt in den Erfassungsradius des Detektors übereinstimmt. Gleiches gilt für den Austritt aus diesem Bereich.

In beiden Fällen handelt sich um eine als konstant angenommene Reisegeschwindigkeit – differenzierte Aussagen zu Engpässen mit niedrigeren gefahrenen Geschwindigkeiten bzw. zwischenzeitlich höherem Tempo können nicht getroffen werden.

Wie bereits angedeutet, ist die so ermittelte Reisegeschwindigkeit jedoch fehlerbehaftet. Die Reisegeschwindigkeit ergibt sich anhand des Quotienten aus dem Abstand zwischen beiden Erfassungspositionen und der für die Überbrückung des Abstandes benötigten Zeitdifferenz entsprechend Formel 5:

$$v = \frac{s_2 - s_1}{t_2 - t_1}$$

Formel 5

Die Zeitmessung ist in diesem Zusammenhang nahezu fehlerfrei. Der Zeitversatz, der sich technikbedingt zwischen Erfassung und Datenspeicherung ergibt, liegt im Millisekundenbereich, sodass der Fehler der Zeitmessung daher für diese Anwendung vernachlässigbar ist.

Problematischer ist hingegen die Ortsmessung. Bei der Detektion kann die Position der Erfassung innerhalb des Erfassungsradius nicht hinreichend genau ermittelt werden. Die Erkennung kann demnach an einem beliebigen Punkt dieses Bereiches erfolgt sein. Wird der Fehler in der Ortsmessung an beiden Positionen mit $\Delta s_{1,2}$ bezeichnet, ergibt sich aus dem Fehlerfortpflanzungsgesetz der Gesamtfehler für die Geschwindigkeit entsprechend Formel 6:

$$\Delta v = \left| \frac{\partial}{\partial s_1} \frac{s_2 - s_1}{t_2 - t_1} \right| \Delta s_1 + \left| \frac{\partial}{\partial s_2} \frac{s_2 - s_1}{t_2 - t_1} \right| \Delta s_2 = \left| \frac{-1}{t_2 - t_1} \right| \Delta s_1 + \left| \frac{1}{t_2 - t_1} \right| \Delta s_2 = \frac{\Delta s_1 + \Delta s_2}{t_2 - t_1}$$

Formel 6

Unter der Annahme, dass $\Delta s_{1,2} = 10 \text{ m}$ und $t_2 - t_1 = 10 \text{ s}$ betragen, liegt der zu erwartende Fehler für die gemessene Reisegeschwindigkeit somit bei $\Delta v = 2 \text{ m/s}$. Dies entspricht bei einer Geschwindigkeit von $v = 15 \text{ m/s}$ deutlich über 10% ($\Delta v_{[\%]} = 13,3\bar{3}\%$).

Eine Möglichkeit zur Reduktion des Ortsfehlers besteht in der Nutzung des sog. RSSI-Wertes. Dieser Wert, der bei der Erkennung eines bluetoothfähigen Gerätes ebenfalls abgefragt werden kann, ist ein Indikator für die Signalstärke. Je höher dieser Wert ist, d.h. umso stärker er sich dem Wert null nähert, desto dichter befindet sich das detektierte Fahrzeug am Detektor. In [AHME07] konnte der Zusammenhang auch praktisch dargelegt werden. Interne Untersuchungen des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt [MEIL11] zeigten jedoch, dass die Genauigkeit, mit der sich der Abstand eines Bluetooth-

Detektors zu einem anderen Bluetooth-Gerät auf Basis des RSSI berechnen lässt, mit steigendem Geräteabstand sinkt. So ergab sich beispielsweise für einen RSSI-Wert von 70, dass sich das detektierte Bluetooth-Gerät sowohl in 50 als auch 90 Meter Entfernung befinden kann. Für eine metergenaue Entfernungsangabe scheint der RSSI laut diesen Untersuchungen daher zunächst noch ungeeignet.

(3) Fahrzeugklassifizierung

Auf die Fähigkeit zur Fahrzeugklassifizierung wurde bereits eingegangen.

Kenngrößen (innerstädtisch)

Innerstädtisch bestimmen insbesondere Lichtsignalanlagen die Verkehrsabwicklung – die Erfassung von Verkehrskenngrößen hängt daher im innerstädtischen Bereich stark von deren Erfordernissen bei der Generierung einer Datenbasis ab. Als relevante Kenngrößen werden hier folgende Verkehrsdaten eingestuft [RILS10]:

- Anwesenheit
- Belegungszeit (Anwesenheitszeit)
- Wartezeiten (Verlustzeiten)
- Reisezeit
- Zeitlücken (Netto-/Bruttozeitlücke)

(1) Anwesenheit

Die reine Bestimmung der Anwesenheit eines Bluetoothgerätes respektive eines damit in Zusammenhang stehenden Fahrzeuges ist, wie bereits in Abschnitt 4.2 beschrieben, ohne Weiteres möglich. Hierfür dient die Erkennung der MAC-Adresse als hinreichender Beweis für die Anwesenheit einer Einheit bzw. im Rückschluss eines Fahrzeuges. Da nicht alle Fahrzeuge mit bluetoothfähigen, aktiven Geräten ausgestattet sind, kann jedoch nicht jedes Fahrzeug erkannt und damit auch die Gesamtverkehrsstärke nicht direkt erfasst werden. Es handelt sich vielmehr um einen gewissen prozentualen Anteil an detektierbaren Fahrzeugen anhand derer ähnlich zum Floating-Car-Data-Verfahren Rückschlüsse auf die tatsächliche Verkehrslage gezogen werden können. Eine generelle Feststellung der Anwesenheit eines Fahrzeuges, wie sie über fahrzeugimmanente Eigenschaften (z.B. Metallmasse) möglich ist, kann so nicht realisiert werden.

(2) Belegungszeit / Anwesenheitsdauer

Als Belegungszeit wird die Zeitdauer der Anwesenheit einer zu detektierenden Einheit verstanden. Im Fall von Bluetooth entspricht die Belegungszeit der Zeit, die sich ein detektierbares Fahrzeug innerhalb des Erfassungsbereichs aufhält. Unter der Annahme, dass sich ein Fahrzeug aufgrund eines Staus für längere Zeit im abgedeckten Funkbereich

befindet, kann bei erneuter Abfrage der entsprechenden Sendefrequenz ein und dasselbe Gerät auch mehrmals erkannt werden. Die Zeit bis zur erneuten Erkennung hat das Gerät demzufolge im Erfassungsbereich verbracht, womit die Dauer bis zur Wiedererkennung durchaus als Belegungszeit aufgefasst werden kann. Dennoch liegt diesem Herangehen eine starke Unschärfe zugrunde. Bereits bei der ersten Erkennung kann nicht per se davon ausgegangen werden, dass sich das Gerät nicht schon zuvor für eine gewisse Zeit innerhalb des Erfassungsbereiches aufgehalten und nur aufgrund des Frequenzsprungverfahrens bzw. seiner ungünstig gelegenen genutzten Frequenz erst spät erfasst wurde. Das Gleiche gilt auch für den Austritt aus dem Erfassungsbereich – eine Wiedererkennung kann im extremen Fall so lange dauern, dass das entsprechende, wiederzuerkennende Gerät kurz vor der erneuten Detektion aus dem Erfassungsbereich heraustritt. Die Zeit davor hat es dennoch im Detektionsbereich verbracht, womit diese Zeit genau genommen ebenfalls zur Belegungszeit zu zählen wäre. Beide Unschärfen können nicht exakt ermittelt werden, sodass die exakte Bestimmung der Belegungszeit mittels Bluetooth als äußerst ungenau einzuordnen ist.

Aussagen zu Belegungsgraden sind dennoch möglich. Wird die Belegungszeit als Funktion der Zeit betrachtet, so kann in Zeiten mit mehr Stau eine höhere Belegung aufgrund einer längeren Aufenthaltszeit, die sich beispielsweise in einer mehrmaligen Erfassung innerhalb des Detektionsbereiches manifestiert, abgeleitet werden.

(3) Wartezeit / Verlustzeit

Die Kenngröße der Wartezeit beschreibt im allgemeinen Sinne den Zeitverlust einer betrachteten Einheit durch Verzögern, Halten und Beschleunigen. Da keiner dieser Zustände mit Hilfe der Bluetooth-Detektion erfasst werden kann, dient lediglich die Belegungszeit sowie die benötigte Zeit zum Passieren eines Abschnittes als Indikator. So kann bei Betrachtung eines einzelnen Detektors die Belegungszeit auch als Wartezeit interpretiert werden – je öfter das entsprechende Gerät wiedererkannt wurde, desto länger hielt es sich innerhalb des Erfassungsbereichs auf. Ein längerer Aufenthalt impliziert wiederum Verzögerungen bzw. Behinderungen im Verkehrsablauf, die sich entsprechend anhand des Zeitbedarfs quantifizieren lassen. Ob es sich bei diesem Zeitbedarf tatsächlich um einen Zeitverlust und somit um Wartezeit handelt, kann jedoch erst in Verbindung mit weiteren Informationen (z.B. über einen Vergleich mit historischen Daten oder auch weiteren erfassten MAC-Adressen zur gleichen Zeit) geschlussfolgert werden. Befindet sich innerhalb des Erfassungsbereichs eines Detektors bzw. zwischen den Erfassungsbereichen zweier Detektoren eine lichtsignalgesteuerte Kreuzung kann diesbezüglich auch ein Abgleich mit dem zugrundeliegenden Signalzeitenplan Rückschlüsse auf etwaige Verzögerungen erlauben. Wie bereits bei der Erfassung der Belegungszeit handelt es sich bei der Bestimmung von Wartezeiten ebenfalls um recht unscharfe Größen aufgrund der oben beschriebenen Rahmenbedingungen. Auch in diesem Fall kann jedoch bei längeren Aufenthaltszeiten respektive mehrmaliger Erfassung im Detektionsbereich von einer Anhäufung von Verlustzeiten ausgegangen werden.

(4) Reisezeit

Die Reisezeitmessung mittels Bluetooth erfolgt ebenfalls über die Wiedererkennung einer bereits an einer vorherigen Messstation detektierten MAC-Adresse. Schematisch betrachtet (siehe Abbildung 18), entspricht die Reisezeit der Zeitdauer zum Durchfahren einer Strecke (hier als Link bezeichnet) zwischen zwei Erfassungseinrichtungen (hier mit Node A und Node B gekennzeichnet) unter Einbeziehung sämtlicher Haltezeiten und Wartezeiten aufgrund von Verzögerungen an Kreuzungen, Querungen etc. oder anderer Störungen im Verkehrsablauf.

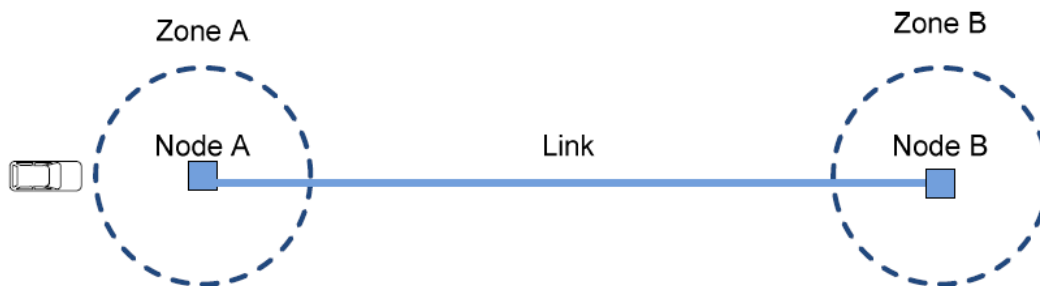


Abbildung 18: schematisches Prinzip der Reisezeitbestimmung siehe [MALI09]

Da bei Bluetooth die bereits beschriebene Unschärfe hinsichtlich zeitlichem Ein- und Austritt in bzw. aus dem Erfassungsbereich (im Bild Zone A und Zone B) vorliegt, beschränkt sich die Angabe der Reisezeit bei der Bluetoothmessung auf die Zeitdauer zwischen den Zeitpunkten, zu denen die MAC-Adresse das erste Mal an den jeweiligen Stationen erfasst wurde unabhängig von weiteren, nachfolgenden Detektionen an diesen Messstationen. [MALI09]

Es ergibt sich nach [MALI09] entsprechend Formel 7 folgender, formaler Zusammenhang für die Bestimmung der bluetoothbasierten, durchschnittlichen Reisezeit.

$$TT_{BT}(k) = \frac{\sum_{j=1}^{n_k} (t_{j,A}(k) - t_{j,B}(k))}{n_k}$$

Formel 7

wobei

$TT_{BK}(k)$	=	bluetoothbasierte, durchschnittliche Reisezeit zwischen 2 Messstationen A und B
k	=	Aufenthaltsdauer
n	=	Anzahl der Erfassungen
$t_{j,A}$	=	Zeitpunkt der Detektion eines Bluetoothgerätes an Station A

Bei der Beurteilung der so geschätzten Reisezeiten ist auch das Wissen über Ausreißer von großer Bedeutung. Als Ausreißer gelten sowohl längere Reisezeiten aufgrund von

Zwischenhalten oder Umleitungen bzw. Umwegen zwischen den beiden Messstationen als auch generell langsamere Reisezeiten, die anderen Verkehrsteilnehmern zuzuordnen sind und die aufgrund dessen aus der Betrachtung separiert werden müssen. Im ersten Fall können auf Basis der bekannten Streckenlänge und der Kenntnisse über zulässige Höchstgeschwindigkeiten, Beschleunigungs- und Bremsvorgänge bei typischen Pkw sowie Signalzeitenlängen an Kreuzungen Akzeptanzintervalle bzw. Schwellenwerte für übliche Reisezeiten auf den entsprechenden Strecken als Referenzsystem genutzt werden. Unter der Voraussetzung, dass keine eklatante Störung vorliegt, die den gesamten Verkehrsfluss einschränkt, ist mit Hilfe solch eines Bezugssystems eine erste Aussonderung extremer Ausreißer, deren Reisezeit das normale Maß weit über- oder unterschreitet, möglich. Im zweiten Fall – der Anfälligkeit der Detektion mittels Bluetooth insbesondere für Ausreißer bezogen auf die Erfassung anderer Verkehrsteilnehmer – ist ebenfalls eine differenzierte Betrachtung der Messwertaussagen notwendig. Neben mit bluetoothfähigen Geräten ausgestatteten Fahrzeugen befinden sich nämlich im bzw. in der Umgebung des Straßenverkehrs weitere Möglichkeiten, entsprechende Geräte zu erfassen. So können beispielsweise Fußgänger und Radfahrer, Fahrzeuge des ÖPNV sowie weiterer MIV ebenfalls Geräte mit aktivierter Bluetoothschnittstelle mit sich führen. Auch in angrenzenden Gebäuden können solche Geräte in Benutzung sein. Aufgrund des relativ großen Detektionsradius sind Erfassungen dieser Gerätschaften, die im Grunde unabhängig vom Verkehrsgeschehen sind und für die Beurteilung desselben daher nicht relevant sind, dennoch möglich und verursachen demzufolge Verfälschungen bei der Reisezeitbewertung. Es ist daher notwendig, einen Schwellenwert für die Beurteilung der mit Bluetooth gemessenen Reisezeiten zu wählen, der einerseits gering genug ist, um fälschlicherweise erfasste Fußgänger in den Messwerten zu eliminieren, andererseits jedoch so groß gewählt ist, dass Fahrzeuge tatsächlich die betrachtete Strecke innerhalb dieser Zeit und unter Beachtung der gegebenen Rahmenbedingungen bewältigen können. [MALI09]

Die Reisezeitmessung mittels Bluetooth ist somit zusammengefasst generell möglich, sollte jedoch mit Vorsicht erfolgen: „Die Reisezeitmessung anhand vorbeifahrender Endgeräte mit Bluetooth-Schnittstelle liefert unter bestimmten Voraussetzungen durchaus belastbare Ergebnisse“ [HOYE11]. Insbesondere in Straßenzügen mit verschiedenen Verkehrsarten (Fußgänger, Radfahrer, ÖPNV, MIV) ist die Reisezeitermittlung mit Bluetooth aufgrund fehlender Zuordnung der Bluetoothgeräte zu den einzelnen Verkehrsarten jedoch schwierig bzw. in speziellen Situationen wie z.B. bei Stau gänzlich unbrauchbar, da sich das Unterscheidungsmerkmal der unterschiedlichen Reisezeiten durch die verschiedenen gefahrenen Geschwindigkeiten in solchen Situationen verschiebt.

So kann es einerseits zur Angleichung der verschiedenen Geschwindigkeitsniveaus kommen: „Kommt es zu einer Staubildung nähern sich [die] Durchschnittsgeschwindigkeiten immer näher an“ [WEIN11]. Andererseits können sich die Geschwindigkeitsniveaus auch gänzlich umkehren. Fahrradfahrer, die auf separaten Fahrradwegen den Stau ungestört passieren können, sind in solchen Situationen u.U. schneller. Führen sie ein aktiviertes,

bluetoothfähiges Gerät mit sich und werden erkannt, liefert deren Messung in diesem Fall ein zu gutes Ergebnis.

(5) Zeitlücke (Brutto- / Nettozeitlücke)

Die Bestimmung von Zeitlücken ist dagegen mit Bluetooth nicht möglich. Dies liegt darin begründet, dass einerseits keine hundertprozentige Abdeckung der Fahrzeuge mit aktivierten Bluetooth-Schnittstellen vorliegt, andererseits nicht jedes detektierbare Gerät auch tatsächlich detektiert wird aufgrund der bereits zuvor beschriebenen Einschränkungen. Für die Messung von Zeitlücken, wie sie beispielsweise mit Induktionsschleifen realisiert werden kann, wären jedoch genau diese Eigenschaften notwendig, um eine Erfassung direkt aufeinander folgender Fahrzeuge gewährleisten zu können. Die Betrachtung der Zeitdifferenz zwischen der Anwesenheit zweier Fahrzeuge mit aktivierten Bluetoothgeräten ist zwar möglich, bringt jedoch hinsichtlich der gewünschten Information, die mit der Kenngröße der Zeitlücke verbunden ist, keinen Erkenntnisgewinn – die Unschärfe bzgl. des tatsächlichen Verkehrsaufkommens wäre in diesem Zusammenhang zu signifikant, um hinreichend genaue Aussagen treffen zu können.

Handhabung

Der Vorteil bei der Detektion mittels Bluetooth ist die „vergleichsweise freie Platzierbarkeit der Messeinrichtung“ [HOYE11]. Durch die Rundstrahlcharakteristik der Funktechnik und die damit verbundene theoretisch gleichmäßige Abstrahlung zu allen Seiten im freien Raum wird ein quasi kreisförmiger Bereich abgedeckt, der einen Reichweitendurchmesser von bis zu 20 Metern bei Bluetooth Klasse 3 bzw. bis zu 40 Metern bei Bluetooth Klasse 2 erreichen kann. Eine punktgenaue Detektierung ist damit wie bereits beschrieben nicht möglich, bietet jedoch den Vorteil, dass die Detektionseinheiten hinsichtlich der beiden verfügbaren Anbringungsarten (neben oder über der Fahrbahn) weitestgehend unabhängig von den örtlichen Gegebenheiten sowie weiteren Einschränkungen platziert und montiert werden können.

Montageorte

Als Montageorte kommen für die Bluetooth-Detektoren bei der Messung neben der Fahrbahn beispielsweise Masten von Verkehrsschildern und Lichtsignalanlagen sowie Straßenlaternen in Frage. Bei Überkopfmessungen können Ausleger von Lichtsignalanlagen, Schilder- und Fußgängerbrücken etc. in Betracht gezogen werden. [WEIN11], [HOYE11]

Dennoch gilt es bei der Platzierung zwei Aspekte zu beachten: zum Einen ist der Abstand zwischen dem Detektor und der Fahrbahn und zum Anderen die Befestigungshöhe für die Verkehrserfassung von Bedeutung. Der Zusammenhang zwischen dem seitlichen Abstand zur Fahrbahn und der verfügbaren Zeit zur Geräteerkennung wurde bereits in Kenngrößen (außerstädtisch) unter Punkt 1 ‚Verkehrsstärke‘ erläutert – je kleiner die zur Verfügung stehende Zeit zur Erkennung von Bluetooth-Geräten ist (z.B. aufgrund höhe-

rer zulässiger Geschwindigkeiten), desto geringer muss auch der Abstand zur im Detektionsradius liegenden Fahrbahn und somit den vorbeifahrenden Fahrzeugen gewählt werden. Ein Optimum wird daher hierbei bei der Anbringung des Detektors direkt über der Fahrbahn erreicht. [HOYE11]

Die Montagehöhe der Messeinrichtung ist insofern von Bedeutung als dass mit ihr einerseits sicherheitstechnische Belange im Hinblick auf den Schutz der Erfassungseinrichtung vor Diebstahl und Vandalismus in Zusammenhang stehen. Andererseits steht der Schutz des Straßenverkehrs sowie der Fußgänger und Radfahrer im Vordergrund – es muss demnach gewährleistet werden, dass die entsprechende Detektionseinrichtung den Verkehr weder gefährdet noch behindert. Das bedeutet, dass die Detektionstechnik in einer solchen Höhe anzubringen ist, dass diese weder seitlich in den auf der Straße befindlichen Verkehr hineinragt, noch bei einer Überkopfanbringung die lichte Höhe unterschritten wird bzw. eine Unfall- oder Verletzungsgefahr vorliegt. In den geltenden Vorschriften der StVo [STVO09] sind nach §§ 39 bis 43 „Allgemeines über Verkehrszeichen und Verkehrseinrichtungen“ (Absatz 3, Punkt 13a) Unterkanten der Verkehrszeichen (und sinngemäß von Verkehrseinrichtungen nach Absatz 5) so anzuordnen, dass sich diese in der Regel außerhalb der Fahrbahn und über Gehwegen 2m über Straßenniveau befinden, über Radwegen 2,20m, an Schilderbrücken 4,50m sowie auf Inseln und an Verkehrsteilern 0,60m. Der seitliche Abstand zur Fahrbahn darf entsprechend in der Regel innerhalb geschlossener Ortschaften 0,50m (jedoch keinesfalls weniger als 0,30m) und außerhalb geschlossener Ortschaften 1,50m betragen. Generell sind diese Zahlen auf das Lichtraumprofil des Straßenverkehrs angepasst, in dem über Geh- und Radwegen eine Höhe von 2,50m und über der Fahrbahn von 4,50m frei zu halten ist. Unter der Bedingung der genannten Höhenrichtlinien sowie dem Schutz vor dem Zugriff Unbefugter ergibt sich ein Richtwert von etwa 3m Höhe für die Anbringung der Bluetooth-Detektoren am Fahrbahnrand. Bei der Anbringung direkt über der Fahrbahn erscheint eine Höhe von 5m sinnvoll. [RASQ96], [PIER10]

Neben den geltenden Vorschriften zur Einhaltung des Lichtraumprofils sind auch umfeldbezogene Rahmenbedingungen zu beachten. Auch wenn für die Erkennung bluetoothfähiger Geräte keine direkte Sichtverbindung notwendig ist, existiert eine Vielzahl von Einflüssen mit abschirmender Wirkung, die eine Verschlechterung hinsichtlich der Reichweite bzw. der Erkennbarkeit der im Fahrzeug mitgeführten Geräte verursachen. So spielen beispielsweise Störeinflüsse im bebauten Umfeld aufgrund von Reflexionen, Abschattungen und Mehrwegeausbreitungen eine große Rolle für die Leistungsfähigkeit des Verfahrens. Genauso sind jedoch auch Reflexionen an Fahrzeugen mit großer metallischer Masse (Lkw) einzuordnen: „[...]insbesondere bei hohem Schwerverkehrsanteil sinkt bei ungünstiger Platzierung auch die Chance einer [...] Sichtverbindung von hinreichender Dauer zwischen der straßenseitig aufgestellten Messstation und den fahrzeugseitigen Geräten“ [HOYE11]. Sofern möglich, erscheint in diesem Sinne die Anordnung über der Fahrbahn aufgrund der fehlenden Bebauung vorteilhafter gegenüber der Montage neben der Fahrbahn. Wie eine Untersuchung der Universität Kassel zeigte, ist jedoch

auch die Überkopfanbringung nicht immer problemlos: „Bei einer zeitgleichen Messung desselben Verkehrsstroms wurden bei der Überkopffosition an einer Fußgängerbrücke im Vergleich zur Messeinrichtung am Fahrbahnrand in 60cm Höhe weniger Geräte erkannt.“ Als vermuteten Grund für dieses Ergebnis führen die Autoren Abschattungen und Reflexionen an der aus Stahlbeton bestehenden Fußgängerbrücke an. [HOYE11]

Neben dauerhaft vorhandenen Störeinflüssen im Höhenbereich kann auch die saisonale Änderung der Vegetation (deren Wassergehalt dämpft die Funkausbreitung) einen Einfluss auf die geeignete Platzierung der Bluetooth-Erfassungseinrichtung haben. Der gewählte Standort sollte daher möglichst unbeeinträchtigt von der Vegetation sein. [HOYE11]

Montageaufwand

Die Wahl des Anbringungsortes richtet sich jedoch nicht nur nach der Güte der Erfassbarkeit der zu detektierenden Bluetooth-Geräte, sondern auch nach dem Aufwand für die Montage. Eine Montage am Fahrbahnrand ist ohne Eingriff in das Verkehrsgeschehen möglich und bedarf daher keiner zusätzlichen sicherheitstechnischen Schutzmaßnahmen des Verkehrsraumes, wohingegen die Überkopffosition einen weitaus höheren Aufwand hinsichtlich der zu treffenden Schutzmaßnahmen aufgrund des Eingriffs in das Verkehrsgeschehen bedeutet. Im Vergleich zu anderen Detektionsarten ist dieser Aufwand bei Bluetooth jedoch insgesamt als gering einzustufen, da weder Änderungen am Verkehrsraum (wie z.B. beim Einbau von Induktionsschleifen in die Fahrbahndecke) noch aufwändige Kalibrierungsarbeiten (wie z.B. bei Kamerasystemen oder Radardetektoren) durchgeführt werden müssen. Befindet sich die Detektionseinheit in einem abschließbaren, tragbaren Koffer, so ist eine einfache Montage mittels eines Schellenbandes z.B. an einem Laternenmast möglich. Ist der Detektor dagegen nicht separat geschützt, ist auch die Unterbringung in einem Schaltschrank neben der Straße möglich, verringert jedoch aufgrund der stärkeren Abschirmung die Erkennungsrate. [TARN08], [HOYE11]

Wartungsaufwand

Darüber hinaus ist auch der zukünftige Aufwand für Wartungsarbeiten bei der Platzierung der Bluetooth-Detektoren einzubeziehen. Unter Wartungsarbeiten werden Eingriffe bei Funktionsstörungen und der Austausch von Komponenten aufgrund von Ausfall oder Fehlfunktion verstanden. Befindet sich die Detektionseinheit in Überkopffosition, so ist der Aufwand für derartige Eingriffe entsprechend höher als bei seitlicher Anbringung am Fahrbahnrand. Auch hier spielt wieder die Anbringungshöhe eine entscheidende Rolle – solange der Detektor in einer Höhe angebracht ist, die gut ohne weitere Hilfsmittel, wie beispielsweise eine Leiter oder Hebebühne, erreichbar ist, sind Wartungsarbeiten einfach und schnell verbunden mit vergleichsweise geringen Kosten realisierbar.

In diesem Sinne ist auch die Stromversorgung zu bewerten. Bluetooth bietet aufgrund seines Funktionsprinzips und der bautechnischen Größe die Möglichkeit, als stationäre

(permanente) oder als mobile (temporäre) Erfassungseinheit zu fungieren. Im mobilen Fall reicht für die Stromversorgung die Ausstattung des Sensors mit einem Akku (z.B. Autobatterie). Solch ein Akku bietet den Vorteil vollkommener Unabhängigkeit von zusätzlichen Kabelverbindungen, sodass der Detektor weitestgehend frei und an beliebiger Stelle des gewählten Standortes angebracht werden kann. Einschränkungen sind auch hier im Zusammenhang mit der Erreichbarkeit bei Wartungsarbeiten zu sehen. So impliziert der Betrieb mit Akku nur eine zeitlich beschränkte Stromversorgung bzw. Lebensdauer - es ist demnach notwendig, den Akku in regelmäßigen Abständen auszutauschen und neu aufzuladen, wodurch hier ein leicht durchzuführender Wechsel und somit eine gute Erreichbarkeit aufgrund der zu erwartenden Austausch-Häufigkeit vorzuziehen ist. Insgesamt ist der mobile Betrieb mit Akku somit eher für kurzfristige Messungen bzw. temporär begrenzte Untersuchungen empfehlenswert. Die Nutzung von Stromkabeln ist demgegenüber weniger flexibel, bedarf jedoch andererseits seltener zusätzlichen Eingriffen solange keine tatsächliche Funktionsstörung bzw. ein Ausfall vorliegt. [TARN08], [BAUM08]

Wirtschaftlichkeit

Die Erfassung mittels Bluetooth erfolgt über mehrere Fahrspuren hinweg und in beiden Richtungen mit ein und derselben Detektionseinheit. Insgesamt werden somit weniger Erfassungseinrichtungen benötigt. Dies wirkt sich entsprechend auf die Kostenbilanz aus: „Durch die Erfassung über mehrere Fahrspuren und in beiden Richtungen sind die Anschaffungskosten pro Messstelle gering.“ [WEIN11]

Investitionskosten

Die Investitionskosten setzen sich zusammen aus den Kosten für die einzelnen Komponenten aus denen der Detektor besteht, den Fertigungskosten sowie allgemeinen Produktionskosten. Unter der Voraussetzung, dass es sich um einen portablen Bluetooth-Detektor mit Akku und portabler Datenspeicherung handelt, liegen die Kosten laut [TARN08] etwa bei US\$ 4000 pro Einheit bei einer Lebensdauer von 3 Jahren. [TARN08] haben diese Kosten wiederum auf den einzelnen Datenpunkt umgelegt – mit der Annahme, dass die Detektionseinheit ca. 50 Datenpunkte pro Stunde liefert und über 12 Stunden des Tages, 7 Tage die Woche in Betrieb ist, würden die Kosten pro Datenpunkt US\$ 0,12 betragen, wobei Installationskosten bereits enthalten sind. Wartungskosten sind hierbei nicht berücksichtigt, werden jedoch auf etwa 10 Prozent der angegebenen Kosten geschätzt, die zusätzlich zu den Gesamtkosten pro Datenpunkt hinzu kommen würden. Bei permanenter Installation des Detektors würden die Kosten hingegen bei ca. US\$ 6000 pro Einheit bei einer Lebensdauer von ebenfalls 3 Jahren liegen. Diese Kosten würden in diesem Fall eine Stromversorgung über Sonnenenergie sowie eine drahtlose Übertragung der Daten an einen zentralen Rechner enthalten, wobei die Unterhaltung dieses zentralen Rechners nicht in den genannten Kosten berücksichtigt ist. Eine daten-

punktbezogene Umrechnung ergibt hierbei Kosten pro Datenpunkt von etwa US\$ 0,20. [TARN08]

Vergleicht man diese Kosten mit entsprechenden Kosten für andere Erfassungstechnologien zeigt sich, dass Bluetooth aus finanzieller Sicht weitaus kosteneffizienter arbeitet als beispielsweise die Datenerfassung mittels Floating-Car-Data, sonstigen GPS-basierten Geräten oder per TEU (Traffic Eye Universal) mit Passiv-Infrarot-(PIR)-System. So besteht laut [TARN08] zwischen der Erfassung mit Bluetooth und mit FCD ein Verhältnis der aufzuwendenden Kosten von 1:100. Der Vergleich mit dem von Inrix [Inrix: www.inrix.com] aufgebauten Echtzeit-Verkehrsinformationsnetzwerk, das Verkehrsinformationen von über 2,5 Millionen GPS-fähigen Fahrzeugen und Geräten sowohl aus öffentlicher als auch privater Hand beinhaltet ist dahingehend nicht so gravierend (die Kosten pro Datenpunkt liegen in diesem Fall sogar nur bei $\frac{1}{4}$ der Kosten mit Bluetooth), fällt jedoch aufgrund der wesentlich geringeren Datenmenge pro Stunde bei der Datenerhebung mittels GPS ebenfalls zugunsten der Bluetooth-Detektion aus.

Die in [TARN08] angegebenen Kosten wurden auf Basis einer Untersuchung der University of Maryland und dem Indiana Department of Transportation im Jahre 2008 veröffentlicht. Es handelte sich hierbei um die Verwendung eines portablen Bluetooth-Detektors, der mit einem Akku für 4 Tage Laufzeit, Mini-PC, Bluetooth-Adapter und austauschbarem Speichermedium (Memory Stick) ausgestattet war und in einem wasserdichten Koffer an einer Schilderbrücke des Indianapolis Motor Speedway befestigt wurde.

Im Rahmen eigener Untersuchungen des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt wurde Anfang des Jahres 2011 ebenfalls eine autarke Bluetooth-Detektionseinheit entwickelt – die dafür aufgewendeten Kosten sollen an dieser Stelle aufgrund ihrer Aktualität als Maßstab für die tatsächlich zu erwartenden Investitionskosten angesehen werden. Im Folgenden findet sich eine Aufschlüsselung der Investitions- und Montagekosten für die Herstellung dieses Bluetooth-Detektionssystems (siehe Tabelle 6). Es ist zu berücksichtigen, dass hier nicht alle Komponenten wie beispielsweise Personal- und Betriebskosten enthalten sind und es sich daher lediglich um Näherungswerte handelt.

Tabelle 6: Kostenkalkulation für einen autarken Bluetooth-Detektor

Kostenauflistung für autarkes Bluetooth-Detektionssystem		
Kostenpunkt	Komponenten	Betrag
Detektor	<ul style="list-style-type: none"> - wasserdichter Koffer - Bluetooth-USB-Adapter (Bluetooth 2.0 mit EDR Class 1, externer Antennenanschluss mit Stummelantenne 1dBi) - Mini-PC mit ARM-Technologie - Software (Bluetooth-Discovery-Script) - interne Verkabelung 	ca. 370,00 €
Stromversorgung	<ul style="list-style-type: none"> - Blei-Akkumulator mit 12Ah - Solarpanel (optional) 	ca. 75,00 € (ca. 150,00 €)
Antennen	<ul style="list-style-type: none"> - externe 2,4 GHz-Antenne - Antennenverlängerungskabel - Antennenfuß - Adapter 	ca. 20,00 €
Datenspeicherung	<ul style="list-style-type: none"> - Micro-SD Card, 4GB oder USB-Stick, 4GB 	ca. 10,00 €
Montage	<ul style="list-style-type: none"> - Befestigungsmaterialien (z.B. mittels Schellenband) 	ca. 10,00 €
Gesamtkosten (ohne Solarpanel)		ca. 485,00 €

Montagekosten

Die Montagekosten für Bluetooth-Detektoren fallen vergleichsweise gering aus. Den größten Anteil an Montagekosten nehmen normalerweise Tief- und Installationsbauarbeiten ein – sie beeinflussen die anfallenden Kosten bei der Ausrüstung eines Messquerschnittes mit Erfassungsgeräten sehr stark. Sind für die Verlegung bzw. Anbringung von Detektoren Aufbrucharbeiten nötig, bei denen Kabelleerrohre und -schächte verlegt werden müssen, steigen die Kosten immens an. Im Fall von Bluetooth entfallen die Kosten für aufwändige Tiefbauarbeiten, wie sie beispielsweise bei der Installation von Induktionsschleifen notwendig sind, jedoch komplett. Grund dafür ist der autarke Aufbau des Detektionssystems durch die Nutzung von Akkus und/oder Solarstromversorgung mit drahtloser Datenübertragung, der die Unabhängigkeit der Bluetooth-Detektoren von der vorhandenen Verkabelung gewährleistet. Lediglich bei der Anbringung in Überkopfposition sowie bei seitlicher Anbringung am Fahrbahnrand in schwer erreichbaren Höhen fallen Kosten für Hebebühnen an. Die manuelle Montage ist mit Hilfe eines Schellenbandes an einem Lichtsignalanlagenausleger, einem Laternenmast oder auch an Schilderbrücken realisierbar.

Die Auflistung der Kosten für Montagearbeiten bei der Installation von Bluetooth-Detektoren erfolgte bereits im Zusammenhang mit den Investitionskosten. Es sei daher hier nochmals auf Tabelle 6 verwiesen.

Betriebskosten

Als Betriebskosten werden die während des Einsatzes anfallenden Kosten verstanden. Zu diesen Kosten zählen beispielsweise laufende Kosten für die Stromversorgung, Personalkosten, die beim Austausch des Akkus in portablen Detektionseinheiten oder aufgrund von Funktions- bzw. Störfallbehebung entstehen. Erfolgt die Datenübertragung drahtlos z.B. per GSM-Funkmodem fallen ebenfalls Kosten für die in einer SMS versendeten Verkehrsdaten an. Alternativ kann ein portables Speichermedium in regelmäßigen Abständen manuell ausgelesen werden, wodurch die Kosten für die Funkübertragung entfallen – in diesem Fall kommen jedoch wiederum Personalkosten für den Aufwand der Ortsbegehung zustande. Desweiteren ist mit laufenden Kosten aufgrund von Verschleißerscheinungen und damit verbundenem Neuerwerb einzelner Komponenten zu rechnen.

Auf eine genaue Kostenangabe sei an dieser Stelle verzichtet. Der Grund dafür liegt in den zurzeit noch fehlenden Erfahrungen hinsichtlich einer Langzeitanwendung. Differenzierte Aussagen zur notwendigen Häufigkeit des Komponentenaustauschs sowie hinsichtlich aufzuwendender Zeiten bei Ortsbegehungen können somit derzeit nicht genauer spezifiziert werden, sodass die oben aufgeführten Installations- und Montagekosten zunächst als grobe Anhaltswerte für die Beurteilung der Kostenbilanz des Bluetooth-Detektionssystems ausreichend erscheinen.

Einsatzbereiche

Verkehrsdetektoren kommen sowohl innerorts- als auch außerorts zum Einsatz. Außerorts stellen Verkehrsbeeinflussungsanlagen (Knoten-, Strecken-, Netzbeeinflussungsanlagen) eines der Hauptaufgabengebiete dar; innerorts bezieht sich die Anwendung dagegen insbesondere auf die Lichtsignalsteuerung. Die verschiedenen Anlagentypen stellen unterschiedliche Anforderungen an die Detektoren hinsichtlich der Verkehrsdatenerfassung und der Anordnung der Messeinrichtung. Aus der benötigten Ausstattung ergeben sich wiederum die notwendigen, auszulegenden Kosten.

Die sich aus den verschiedenen inner- und außerörtlichen Anlagen ergebenden möglichen Anordnungen der Messeinrichtungen sowie die Anforderungen hinsichtlich der Datenerfassung sind der in Anlage F befindlichen Tabelle nach [BAUM08] zu entnehmen.

Anhand der Ausführungen der vorherigen Kapitel wurde ersichtlich, welche Verkehrskenngrößen mit Hilfe der Bluetooth-Detektion erfasst werden können. Es wurde diesbezüglich auf Vor- und Nachteile, Einschränkungen und Besonderheiten, vor allem aber auch Unschärfen bei der Erfassung eingegangen – aus ihnen ergibt sich die Eignung der Messeinrichtung für die verschiedenen Verkehrsanlagen. Betrachtet man die erforderlichen Verkehrskenngrößen für Verkehrsanlagen außerorts, fällt der Fähigkeit zur Erfassung der Verkehrsstärke und der Geschwindigkeit eine besondere Rolle zu. Generell ist die Bluetooth-Detektion wie zuvor dargestellt in der Lage beide Kenngrößen zu erfassen, sodass die Eignung für den Einsatz außerorts gegeben ist.

Ein großes Manko bei der Erfassung mittels Bluetooth stellt jedoch die für sämtliche Verkehrsanlagen notwendige räumliche Unterscheidung dar. Dies kann aufgrund des bereits beschriebenen Erfassungsradius der Messeinrichtung insbesondere für innerstädtische Verkehrsanlagen mit vergleichsweise geringen Entfernungen zu fehlerhafter Detektion bzw. Fehlinterpretation des erfassten Verkehrs führen. Würden sich beispielsweise Bluetooth-Detektoren im Knotenpunktbereich kurz vor der Haltelinie befinden und gäbe es an allen Zufahrten solche Detektoren, so würden sich die Erfassungsbereiche dieser Detektoren überlappen – dies würde wiederum dazu führen, dass Detektoren der einen Zufahrt Fahrzeuge detektieren, die sich jedoch im Staubereich einer anderen Zufahrt befinden. Insbesondere für die bedarfsgesteuerte Phasenforderungen erscheint dieser Aspekt von Bedeutung. Hinzu kommt, dass eine bedarfsgesteuerte Phasenforderung voraussetzen würde, dass alle Fahrzeuge mit aktivierten, bluetoothfähigen Geräten ausgestattet sind, um den Bedarf einer Signalprogrammanpassung sofern er besteht, sicher zu erkennen. Da dies jedoch nicht per se der Fall ist, ist eine Anwesenheitsdetektion mit Bluetooth nur im begrenzten Maße möglich.

Auch wenn der Einsatz der Bluetooth-Detektoren im Hinblick auf Signalprogrammanpassungen ungeeignet erscheint, muss eine Verwendung solcher Erfassungseinrichtungen im Bereich von Lichtsignalanlagen nicht vollkommen ausgeschlossen werden. Eine mögliche alternative Anwendung kann in der Erzeugung von Verflechtungsmatrizen gesehen werden. Eine Verflechtungsmatrix veranschaulicht die Quelle-Ziel-Beziehungen eines betrachteten Verkehrsraumes. Bezogen auf einen Knotenpunkt wird somit die Verteilung des Verkehrs auf die Knotenpunktarme, d.h. die Zu- bzw. Abfahrten der Kreuzung, dargestellt [HILT96]. Erfolgt die Anordnung der Bluetooth-Detektoren so, dass eine unabhängige Erfassung der vorhandenen Knotenpunktzufahrten gewährleistet werden kann - also mit entsprechender Entfernung zum eigentlichen Kreuzungsbereich - ist eine Detektion der Verkehrsnachfrage und somit auch eine Aussage über die Verteilung des Verkehrs auf die einzelnen Arme bei erfolgreicher Wiedererkennung nach Passieren des Knotenpunktes möglich. Eine Eignung für Verkehrsanlagen innerorts kann somit unter bestimmten Bedingungen durchaus in Betracht gezogen werden.

Neben einzelnen Verkehrsanlagen ist die Verkehrsdatenerfassung auch im makroskopischen Sinne der Netzbeeinflussung von Interesse. Bluetooth bietet hierbei gegenüber herkömmlichen Erfassungssystemen den Vorteil einer flächendeckenden Verkehrsdatenerfassung. Wird die Detektion mittels Bluetooth als autarkes Erfassungssystem konzipiert, so besteht aufgrund der Unabhängigkeit von Stromversorgungs- und Datenübertragungsinfrastruktur, ein quasi unbegrenztes Spektrum an Einsatzorten und damit verbunden auch die Möglichkeit einer netzweiten Erfassung der eindeutigen MAC-Adresse. Die Verteilung der Routenströme im Netz wird somit ermittelbar. Die vergleichsweise geringe Anzahl benötigter Detektoren aufgrund der bereits genannten fahrstreifen- und - richtungsunabhängigen Erfassung erlaubt diesbezüglich eine großräumige Ausstattung bei gleichzeitig geringen Kosten. Ein Einsatz des Bluetooth-Erfassungssystems erscheint somit insbesondere für Verkehrsmanagementzentralen in Ballungsräumen, aber auch zu

Steuerungszwecken an Autobahnen und auf Bundesfernstraßen beispielsweise im Umkreis von Stau- und Unfallschwerpunkten sowie bei Umfahrungen und Umleitungen aufgrund von Baustellen geeignet.

4.2.4 Einordnung in den Kontext gängiger Detektionsverfahren

Die verschiedenen Detektionssysteme haben unterschiedliche Fähigkeiten und sind dementsprechend für bestimmte Aufgabenstellungen mehr oder weniger gut geeignet. Auch die Bluetooth-Technologie besitzt sowohl Stärken als auch Schwächen hinsichtlich des Einsatzes als Verkehrsdetektor, wie die im vorherigen Kapitel vollzogene Untersuchung der Leistungsfähigkeit eines solchen Bluetooth-Detektors anhand bestehender Anforderungen widerspiegelt.

Der tatsächliche Wert der Bluetooth-Detektion für die Verkehrslageerfassung zeigt sich jedoch nicht nur anhand seiner Fähigkeiten zur Erfüllung einzelner Anforderungen, sondern auch im Vergleich zu bzw. in Verbindung mit anderen, bereits im Einsatz befindlichen Detektionsarten. So vermag eine Gegenüberstellung zu den derzeit gängigen Detektionseinrichtungen darzustellen, inwieweit Bluetooth als eigenständiger, alternativer Detektor im Verkehrsraum in Frage kommt bzw. welchen Beitrag diese neue Technologie im autarken Sinne oder in Verbindung mit anderen Detektoren zukünftig für die Aufnahme von Verkehrsdaten leisten kann. Für eine detaillierte Beschreibung der Funktionsweise der einzelnen Detektionsverfahren sei an dieser Stelle auf [BAUM08] verwiesen.

Für einen detaillierten Vergleich der verschiedenen Detektionsarten sollen an dieser Stelle wieder die in Abschnitt 4.2.2 gewählten Qualitätskriterien bemüht werden. In diesem Sinne beinhaltet die Tabelle (siehe Anlage G) eine Zuordnung der unterschiedlichen Detektoren zu den vier Oberkriterien (Datenerfassung, Handhabung, Wirtschaftlichkeit, Einsatzbereich) mit ihren darunter aufgeschlüsselten Merkmalen, die bereits bei der Untersuchung der Bluetooth-Detektion in Abschnitt 4.2.3 beleuchtet wurden. Um einen direkten Vergleich zu vereinfachen, sind in dieser Tabelle auch die im vorherigen Kapitel herausgearbeiteten Ergebnisse bzgl. der Erfassung mittels Bluetooth-Technologie integriert.

Als zusammenfassendes Ergebnis dieses Vergleichs sind in der Tabelle in Anlage H nochmals die Vor- und Nachteile der Bluetooth-Detektion verbal aufgeführt und den Vor- und Nachteilen der in der Praxis vorhandenen Detektoren gegenübergestellt. Auch die Eignung der jeweiligen Detektionsart für die Verkehrsdatenerfassung ist in dieser Tabelle kommentiert.

Es zeigt sich, dass die Bluetooth-Technologie im direkten Vergleich mit anderen Detektoren durchaus respektable Vorzüge vorweisen kann und ein Einsatz insbesondere hinsichtlich ihrer schnellen und einfachen Handhabung sowie der kostengünstigen Herstellung gerade bei kurzzeitiger Datenerfassung wesentliche Vorteile gegenüber herkömmli-

chen Erfassungseinrichtungen wie beispielsweise Induktionsschleifen und Videodetektoren birgt.

Die Nutzung eines frei verfügbaren, eindeutigen Erkennungsmerkmals (MAC-Adresse) bietet trotz datenschutzrechtlicher Bedenken eine Möglichkeit zur Ermittlung von Quelle-Ziel-Beziehungen und somit zur Erstellung von OD-(Origin-Destination)-Matrizen, wie sie bisher nur mit Hilfe der automatischen Kennzeichenerhebung per Videodetektion realisiert werden konnte. Im Vergleich zur Videodetektion besteht zudem der Vorteil der weitestgehenden Resistenz gegenüber schlechten Witterungsbedingungen. Die Detektion per Videokamera ist dagegen aufgrund ihrer Anfälligkeit hinsichtlich schlechter Sicht- und Beleuchtungsverhältnisse nur in witterungsgeschützten Bereichen wie beispielsweise in Tunneln zur Dauererfassung von Verkehrskenngrößen geeignet. [FGSV06]

Auch im Vergleich zu den als besonders gut für die Verkehrslagerfassung geeigneten Techniken wie Induktionsschleifen und Laserdetektoren kann die Bluetooth-Technik Vorteile vorweisen. Die oben genannte Fähigkeit zur Ermittlung von Quelle-Ziel-Relationen liefert nicht nur die Verteilung der Verkehrsströme im Netz, sondern ermöglicht auch eine flächendeckende Erfassung und Beurteilung der Verkehrslage. [SACH02] betont insbesondere diesen Aspekt als Schwachstelle der im Verkehr gängigen Induktionsschleifendetektoren. So seien die bisher zu Steuerungszwecken eingesetzten Induktivschleifen nur eingeschränkt für den Einsatz von Managementzentralen in Ballungszentren geeignet, da sie keine flächendeckende Verkehrsdatenerfassung bieten und im Gegensatz zu autarken Detektionssystemen in Abhängigkeit von Stromversorgungs- und Datenübertragungsinfrastruktur stehen. [BAUM08]

Trotz seiner Vorzüge ist ein Detektor auf Bluetooth-Basis nur bedingt als Einzeldetektor einsetzbar. Entscheidender Nachteil ist die Unschärfe der Verkehrskenngrößen mit räumlichem Bezug, die sich aus dem Erfassungsprinzip ergibt. Gerade bei der Erfassung von Reisezeiten und -geschwindigkeiten resultieren daraus hohe Ungenauigkeiten, da die genaue Position der erfassten MAC-Adresse innerhalb des Erfassungsradius nicht ohne weiteres eindeutig festgestellt werden kann. Soll beispielsweise die Reisezeit zwischen zwei Messstationen bestimmt werden und wird davon ausgegangen, dass alle verwendeten Geräte mit Bluetooth der Klasse 2 ausgestattet sind, so besteht bereits hier ein maximal möglicher Positionsfehler von 80 Metern, da beide Messeinheiten einen Reichweitendurchmesser von jeweils 40 Metern besitzen und die Detektion eines Gerätes bei Messeinheit 1 direkt beim Eintritt in den Erfassungsradius geschehen kann, wohingegen bei Messeinheit 2 die Detektion erst kurz vor Austritt aus diesem Bereich erfolgen kann. Wird nun stattdessen auch noch Bluetooth der Klasse 1 verwendet, steigt der Fehler nochmals um ein Vielfaches an – da Bluetooth der Klasse 1 einen Reichweitendurchmesser von 200 Metern besitzt, existiert hier insgesamt ein maximal möglicher Fehler von 400 Metern. Möglichkeiten zur Verringerung des Fehlers bei der Ortsmessung bestehen in der Verwendung mehrerer Detektoren anhand derer die Reihenfolge des Abfahrens und damit zumindest eine entsprechende Richtung eingegrenzt werden kann sowie in

der Nutzung des RSSI-Wertes. Dennoch ist die Genauigkeit der Bluetooth-Detektoren hinsichtlich der Positionsbestimmung gegenüber anderen Detektionsverfahren zunächst als unzureichend einzustufen.

Auch die Verfügbarkeit von Verkehrsdaten ist im Vergleich zu den herkömmlichen Detektionsarten als Manko der Bluetooth-Detektion anzusehen. Gegenüber Erfassungstechnologien, die auf systemimmanente Eigenschaften der Fahrzeuge (wie z.B. metallische Masse, Reflektions- oder Temperaturverhalten) reagieren, ist die Detektion mittels Bluetooth darauf angewiesen, dass sich ein entsprechend aktiviertes, bluetoothfähiges Gerät innerhalb des zu detektierenden Fahrzeuges befindet. Ist dies nicht der Fall, kann keine Detektion erfolgen – die Anzahl an Detektionen ist dementsprechend wesentlich geringer als es beispielsweise bei Induktionsschleifen, Laser- oder auch Infrarotdetektoren der Fall ist, die theoretisch in der Lage sind, quasi jedes Fahrzeug zu erfassen. Dafür offeriert Bluetooth jedoch die Möglichkeit einer eindeutigen Wiedererkennung und somit einer genaueren Aussage hinsichtlich des Bewegungsprofils eines spezifischen Fahrzeuges – diese Fähigkeit besitzen ansonsten nur die Verkehrsdatenerfassung per Videokamera und per Floating Car Data. Die Vorteile von Bluetooth gegenüber der Videodetektion wurden oben bereits erläutert. Vergleicht man dementsprechend die Erfassung über FCD mit der Bluetooth-Detektion, zeigt sich, dass die FCD-Daten zwar gegenüber Bluetooth eine hohe Genauigkeit der gelieferten Kenngrößen bieten, jedoch auf der anderen Seite in der Ermittlung vergleichsweise kostenintensiv sind und im Endeffekt wesentlich weniger Datensätze vorliegen. Das Ergebnis einer vergleichenden Untersuchung zur Reisezeiterfassung mittels Bluetooth und Floating Car Data [TARN08] sieht diesbezüglich deutlich den Vorteil auf Seiten der Bluetooth-Detektion (siehe Abbildung 19). Der Grund für die geringe Stichprobengröße der FCD-Daten liegt darin, dass die zu detektierenden Fahrzeuge zunächst technisch angepasst werden müssen – eine Ausrüstung privater Fahrzeuge wäre in diesem Sinne zu teuer, sodass Fahrzeugflotten, wie beispielsweise Taxiflotten oder auch Auslieferdienste wie DHL, die über ein entsprechendes Dispositionssystem verfügen, verwendet werden. Die Anzahl der Fahrzeuge in diesen Flotten ist gemessen am Gesamtverkehrsaufkommen jedoch sehr gering, sodass die Stichprobenmenge ebenfalls klein ausfällt. Ein weiterer Nachteil der FCD-Detektion gegenüber Bluetooth ist, dass das Verhalten von Taxis sowie Paketlieferdiensten im Verkehrsgeschehen teilweise vom tatsächlichen Verkehrsgeschehen abweicht – so verhalten sich Taxis, die sich im Parksuchverkehr, auf extra Bus-/Taxifahrspuren oder auf der Suche nach Kunden bzw. beim Warten auf Fahrgäste befinden anders als der sie umgebende Verkehr.

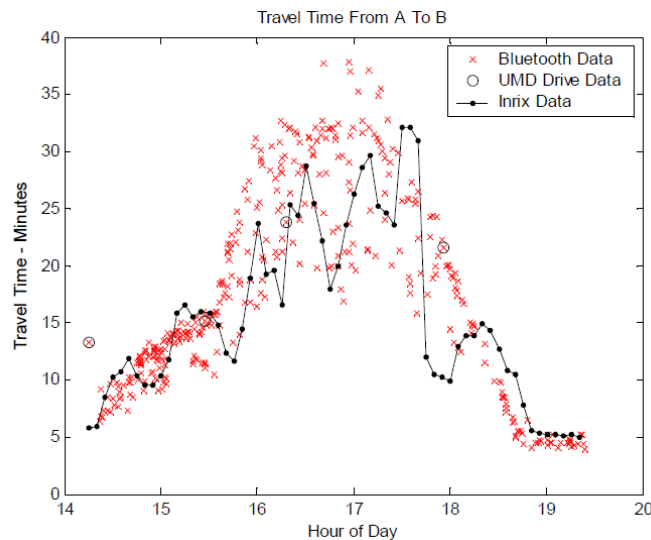


Abbildung 19: Reisezeitdaten auf Basis verschiedener Datengeber [TARN08]

Die genannten Vor- und Nachteile der Bluetooth-Detektion offenbaren insgesamt eine eingeschränkte Eignung dieser Technologie für den Einsatz als Einzeldetektor im Sinne der Verkehrsdatenerfassung. Es erscheint daher sinnvoll, Bluetooth-Detektoren in Kombination zu anderen Detektionsarten zur Anwendung kommen zu lassen. „In den sogenannten Kombinationsdetektoren sind verschiedene Sensorsysteme vereinigt, um die Vorteile der einzelnen Systeme zu kombinieren und deren Nachteile zu kompensieren“ [FGSV10]. Durch eine bestimmte Detektionstechnik nicht abgedeckte Anforderungen können so durch parallelen Einsatz anderer Detektoren mit entsprechenden Fähigkeiten ausgeglichen werden. Üblicherweise werden bei diesen Kombinationsdetektoren Dopplerradar, Ultraschall unter Umständen auch mit Passiv-Infrarot gekoppelt, da diese Techniken als Einzeltechniken in der Regel beim Einsatz in Verkehrsbeeinflussungsanlagen nicht allen Anforderungen an die Verkehrsdatenerfassung genügen, jedoch in speziellen Bereichen sehr genaue Ergebnisse liefern. So ermittelt der Radarsensor die Geschwindigkeiten, der Ultraschallsensor tastet die Fahrzeugprofile ab und erlaubt damit eine möglichst genaue Fahrzeugzählung und -klassifizierung, wohingegen der Passiv-Infrarot-Sensor Längenangaben der Fahrzeuge liefert und so sicherstellt, dass nur Fahrzeuge des gewünschten Fahrstreifens erfasst werden. [FGSV10]

In diesem Sinne erscheint auch Bluetooth als zusätzliche, parallel arbeitende Technik in Betracht zu kommen. So sind beispielsweise außerorts Anwendungsgebiete im Bereich von Umfahrungen oder Umleitungen aufgrund von Stau oder Baustellen denkbar. Eine Ausstattung der dann genutzten Strecken mit hoch genauer, aber auch teurer Technik würde sich aufgrund der vergleichsweise geringen Häufigkeit solch einer Nutzung bzw. auch wegen der zeitlichen Begrenzung etwaiger Situationen nicht lohnen. Um jedoch einen groben Überblick über die vorliegenden Zustände auf den entsprechenden Strecken zu erhalten, würde sich eine kostengünstige sowie schnell und flexibel zu installierende Erfassungseinheit, wie sie die Bluetooth-Detektion darstellt, anbieten. Zudem verursachen die Aufwendungen für Verkabelung und Datenleitungen besonders in ländlichen

Regionen extrem hohe Kosten (ca. 70.000 € pro km verlegtes Kabel), sodass hier ein autarkes System mit interner Stromversorgung (Akku-Betrieb) einen wesentlichen Vorteil bietet. In innerörtlichen Gebieten, in denen diese Technologie aufgrund ihrer hohen Unschärfe für punktuell wirksame Anlage weniger geeignet ist, erscheint wiederum ihre Fähigkeit zur Erfassung von Quelle-Ziel-Relationen gewinnbringend einsetzbar zu sein, da innerorts insbesondere die Verteilung der Routenströme auf die verschiedenen Zu- bzw. Abfahrten der Knotenpunkte von Interesse ist und eine kostengünstige, flächendeckende Erfassung auch im Hinblick auf die Optimierung des Verkehrsmanagements zunehmend an Bedeutung gewinnt.

4.2.5 Zwischenfazit

Die im vorherigen Kapitel diskutierte Eignung der Bluetooth-Technologie hinsichtlich der Verkehrsdatenerfassung zeigt deutlich die Möglichkeiten, aber auch die Grenzen auf, die sich aus der Verwendung des Bluetooth-Detektionssystems ergeben. Es konnte dargestellt werden, dass die Bluetooth-Technologie durchaus in der Lage ist, einige der allgemein an Detektoren gestellten Anforderungen zu erfüllen – neben wesentlichen Vorteilen, insbesondere im Hinblick auf die betrieblichen Anforderungen bei Montage und Instandhaltung, die einen einfachen und kostengünstigen Einsatz dieser Technik erlauben, existieren jedoch auch Schwächen der Technologie z.B. im Bereich der verlangten Genauigkeitsanforderungen.

Als Fazit der qualitativen Untersuchung der Bluetooth-Technologie im Sinne der Verwendung zur Verkehrslageerfassung lässt sich feststellen, dass Bluetooth für die Erhebung von Verkehrsdaten genutzt werden kann. Eine Eignung besteht jedoch nicht im generellen Sinn, sondern nur unter gewissen Rahmenbedingungen. Die Einschränkungen, denen diese Technologie unterliegt und die daraus erwachsenden Schwachstellen beziehen sich insbesondere auf die Unschärfe bei der Erfassung räumlich bezogener Verkehrskenngrößen wie z.B. Reisezeiten und –geschwindigkeiten sowie auf die eingeschränkte Verfügbarkeit geeigneter Detektionsobjekte, da diese abhängig vom Ausstattungsgrad externer, im Fahrzeug mitgeführter mobiler Geräte sind. Die für die Detektion notwendige Aktivierung bluetoothfähiger Geräte ist nicht per se gegeben, sodass nur ein gewisser Prozentsatz der im Verkehr befindlichen Fahrzeuge erfasst werden kann. Als Einzeltechnik zur Erhebung von Verkehrsdaten ist diese Technologie aufgrund dessen nicht geeignet. Vorteile, die sie dennoch für den Einsatz bei der Verkehrslageerfassung in Betracht kommen lassen, liegen insbesondere in ihren Fähigkeiten zur Erstellung von Quelle-Ziel-Beziehungen und der damit verbundenen durchführbaren flächendeckenden Erfassung sowie der Unabhängigkeit von Stromversorgungs- und Datenübertragungsinfrastrukturen im Akku-Betrieb, die einen schnellen und flexiblen, autarken Einsatz ermöglicht.

4.3 Analyse potentieller Einsatzbereiche

Im folgenden Abschnitt dieses Kapitels sollen vorhandene Ansätze, bereits prototypisch implementierte Anwendungen sowie denkbare weitere Einsatzfelder der Bluetooth-

Technologie im Sinne einer Verkehrserfassungseinrichtung aufgezeigt und erläutert werden. Es ist zu beachten, dass es sich hierbei lediglich um eine Auswahl besonders vielversprechend erscheinender Ansätze handelt – weitere Einsatzszenarien sind daher nicht ausgeschlossen. Der Fokus wurde bei den genannten Anwendungen zudem ganz bewusst darauf gelegt, dass die Bluetooth-Technologie als zumeist passiver Verkehrsdetektor im Mittelpunkt der Betrachtung steht, sodass nur in wenigen Fällen die Notwendigkeit einer aktiven Zustimmung von Seiten der Nutzer zur Verwendung der MAC-Adressen ihrer Bluetooth-fähigen Geräte besteht. Diese Herangehensweise wurde deswegen gewählt, weil gerade in der Passivität der Nutzer, d.h. in der frei verfügbaren Erfassbarkeit ihrer Bluetooth-Geräte ohne zusätzliche Ausstattung mit externer Technik bei gleichzeitig eindeutiger Identifizierbarkeit ein entscheidender Vorteil für den Einsatz der Bluetooth-Technologie im Bereich der Verkehrserfassung liegt.

Die Anwendungsszenarien wurden der Übersichtlichkeit wegen in folgende Kategorien aufgeteilt:

- Individualverkehr (IV)
- Motorisierter Individualverkehr (MIV)
- Öffentlicher Verkehr (ÖV)
- Verkehrsmanagement
- Verkehrsplanung.

Zu jeder Kategorie werden wiederum mehrere Einsatzfelder mit dem spezifischen Anteil, den die Bluetooth-Technologie im jeweiligen Zusammenhang erbringen kann, vorgestellt.

4.3.1 Individualverkehr

Warteschlangensysteme: Ermittlung von Wartezeiten

Bei der Erfassung des Individualverkehrs stehen insbesondere häufig genutzte Wege und deren Engpässe sowie sich daraus ergebende Reisezeitverluste im Fokus der Betrachtung.

Als geeignetes Anwendungsfeld der Bluetooth-Detektion kann diesbezüglich die Erfassung der MAC-Adressen von Fluggast-Mobilgeräten (Mobiltelefon, PDA, Laptop) zur Planung des Flughafen-Check-Ins gesehen werden. In einem ersten Pilotprojekt hat ein Forscherteam der Purdue Universität im Auftrag der US-amerikanischen Transport Security Agency (TSA) vom 8. Mai bis zum 2. Juni 2009 mittels eines auf der Bluetooth-Technologie basierenden, anonymisierten Erfassungssystems die Zeiten gemessen, die Passagiere benötigen, um den Sicherheitscheck am Flughafen Indianapolis zu passieren. Dafür wurde eine Erfassungseinheit im Wartebereich vor den Sicherheitskontrollen und eine weitere ca. 60 Meter hinter der Kontrollstelle eingerichtet. Als Erfassungseinheiten kamen Bluetooth-Adapter der Klasse 2 mit einer ungefähren Reichweite von 10 Metern zum Einsatz. Ergebnis dieser Untersuchung war, dass die erfassten Passagiere durch-

schnittlich etwa 15 Minuten brauchten, in Hauptlastzeiten (Montagsmorgens gegen 06:00 Uhr) auch bis zu 20 Minuten. In Abhängigkeit des Wochentages schwankte zudem die erfasste Anzahl an Passagieren zwischen 5% und 6,8%. [BULL09]

Die Ermittlung der Passierzeiten erlaubt einerseits dem Flughafenmanagement eine genauere Einsatzplanung der am Check-In benötigten Personalkapazität sowie deren zeitlich flexible Anpassung entsprechend des vorliegenden Bedarfs, andererseits können darüber wiederum Informationen über aktuelle Wartezeiten generiert werden, sodass Fluggäste, die sich noch vor dem Sicherheitsbereich befinden, ihren Check-In besser planen können. [BULL09]

Insgesamt wurden in der Zeit des Testlaufs am Flughafen Indianapolis mehr als 2 Millionen Datensätze aufgezeichnet. Um dem Datenschutz zu genügen, wurden jedoch bei der Berechnung der Reisezeiten die zugrunde liegenden MAC-Adressen um jeweils drei Ziffern gekürzt – mit dieser Prozedur bleibt gerade soviel Informationsgehalt in den Daten erhalten, dass eine ausreichende Einzigartigkeit des entsprechenden Datensatzes für eine zuverlässige Reisezeitschätzung gewährleistet werden kann. Dennoch reichen die verbleibenden Informationen nicht aus, um vorhersagbare Bewegungsprofile zu erstellen oder Personalisierungen durchzuführen. Eine weitere Möglichkeit, um datenschutzrechtlichen Bedenken Rechnung zu tragen, besteht in der Verwendung eines einseitigen Hash-Algorithmus bei dem Hashwerte der MAC-Adressen gebildet werden. Dieser Vorgang wäre laut [BULL09] wesentlich robuster und verhindert das Abspeichern der eindeutigen MAC-Adresse. Darüber hinaus wurden am Flughafen Indianapolis Hinweisschilder mit entsprechenden Informationen zur verwendeten Technik installiert. Da bei einer erfolgten Wiedererkennung einer MAC-Adresse am zweiten Erfassungspunkt, über die Reisezeitermittlung hinaus keine Notwendigkeit zur weiteren Aufbewahrung besteht, kann die Adresse somit innerhalb weniger Stunden gelöscht und nur das Reisezeit-Ergebnis archiviert werden. [BULL09]

Neben dem Pilotprojekt am Flughafen Indianapolis bestehen darüber hinaus auch an anderen Flughäfen entsprechende Untersuchungen. So ist beispielsweise die Implementierung solch eines Systems am Londoner Flughafen Heathrow in Arbeit und auch am Frankfurter Flughafen in Deutschland wird die Wartezeitverkürzung durch Auslesen von MAC-Adressen erprobt. So setzt die Betreibergesellschaft Fraport bereits seit Ende 2009 im erweiterten Testbetrieb ein auf Bluetooth basierendes System zur Ermittlung von Wartezeiten an acht wichtigen Luftsicherheitskontrollstellen, an deren Zu- und Abgängen die MAC-Adressen bluetoothfähiger Geräte erfasst werden, ein. Um auch hier der Datenschutzfrage gerecht zu werden, erfolgt in diesem Fall eine Verschlüsselung der Geräteerkennung bereits im auslesenden Sensor. Die tatsächlichen MAC-Adressen werden somit nicht übertragen und damit eine Möglichkeit zur Zuordnung der gemessenen Wartezeiten zu individuellen Personen verhindert. Zudem werden die verschlüsselten Daten auch hier wenige Stunden später vollständig gelöscht und aufgestellte Hinweisschilder ermöglichen es den Passagieren, selbst zu entscheiden, ob sie die Bluetoothfunktion ihres Gerä-

tes aktiviert lassen oder vorher abschalten möchten. Da die Installation in Frankfurt nur auf die acht Sicherheitskontrollstellen beschränkt ist, können keine Bewegungsprofile der Passagiere erstellt werden. Sowohl in Frankfurt am Main als auch in Heathrow wurden rund 10 Prozent der Passagiere mit aktiviertem, bluetoothfähigem Gerät detektiert.

Positionierungssysteme: Ermittlung der geografischen Position

Für die Erfassung von Objekten kann es erforderlich sein, die aktuelle Position möglichst präzise bestimmen zu können. Typische Positionierungssysteme wie GPS sind verbreitet und arbeiten hinreichend genau, dennoch stoßen auch sie unter gewissen Bedingungen an ihre Grenzen. Dies trifft insbesondere in dicht bebauten Gebieten oder innerhalb von Gebäuden zu. Bluetooth als Funk-Standard, der sowohl im Innen- als auch im Außenbereich eingesetzt werden kann, kann hierbei eine sinnvolle Ergänzung bzw. teilweise Alternative darstellen. Wie im Mobilfunk lässt sich das Empfangsgebiet um einen Sendestation herum in Zellen einteilen – befindet sich ein Endgerät innerhalb einer solchen Zelle kann es der geografischen Position der Sendestation zugeordnet werden. Da Bluetooth eine relativ geringe Reichweite besitzt, sind die Zellen um die Basisstation deutlich kleiner, ermöglichen damit jedoch gleichzeitig auch eine präzisere Standortbestimmung.

Grundlage der Positionsbestimmung ist das Vorhandensein von Referenzpunkten, deren absolute Position z.B. mittels GPS-Koordinaten bestimmt wird und entsprechend bekannt ist. Das bedeutet, dass zunächst die Position der Basisstation hinreichend präzise bestimmt werden muss, um die Position von Endgeräten, die sich innerhalb des Empfangsbereichs der Station befinden, möglichst genau bestimmen zu können.

Die Positionierung selbst kann dann auf verschiedene Arten erfolgen. Die einfachste Möglichkeit besteht darin, als Position des Endgerätes die Koordinaten des Referenzpunktes zuzuordnen. Befindet sich das Gerät in der Nähe mehrerer Referenzpunkte wird der mit der geringsten Entfernung ausgewählt – die Entfernung kann anhand der Signalstärke oder -laufzeit gemessen werden. Eine zwei- oder auch dreidimensionale Position kann ebenfalls ermittelt werden. Hierfür wird die Distanz zu mindestens drei (bzw. vier) verschiedenen Bezugspunkten benötigt. Mittels Triangulation kann dann die Koordinate des Endgerätes bestimmt werden.

Als konkreter Anwendungsversuch der Positionierung mittels Bluetooth kann der Bluetooth Indoor Positioning Service von [ANAS03] gesehen werden. Hierbei werden mobile Geräte (Handgeräte mit Bluetooth-Schnittstelle) und Desktop-PCs genutzt, um innerhalb von Gebäuden Benutzer aufzuspüren. Die PCs dienen dabei als Referenzpunkte und können über das Kabelnetzwerk untereinander kommunizieren. Wird ein von einem Benutzer mitgeführtes mobiles Endgerät erfasst, wird dessen Position als Koordinate des Referenzpunktes zusammen mit der UserID des Nutzers, die im Gerät hinterlegt ist, und der Geräteerkennung (MAC-Adresse) auf einem zentralen Datenbankserver gespeichert. Soll dann der Aufenthaltsort eines bestimmten Benutzers herausgefunden werden, kann dieser über die UserID aufgespürt werden. Durch die Verwendung von Klasse 2 Bluetooth-

Adaptieren in den Geräten beträgt die Reichweite lediglich 10 Meter. Damit ist jedoch wiederum die Zellgröße um die Basisstationen (Referenzpunkte) ebenfalls entsprechend klein und eine Ortung der Handgeräte mit einfachen Mitteln sehr präzise möglich. Die damit verbundene Sendeleistung reicht um einen Raum abzudecken, sodass pro Raum die Installation eines Referenzpunktes zumeist ausreichend ist. Für die Positionierung genügt in diesem Fall die einfache Nachbarschaftserkennung, d.h. die Nutzung der Koordinate des Referenzpunktes als Position des erfassten Handgerätes. Ein Nachteil besteht bei diesem System in der benötigten Zeit zur Detektion – erst bei einer Aufenthaltszeit von mindestens etwa 3,84 Sekunden im Empfangsbereich des Referenzpunktes könnten laut [ANAS03] im Schnitt 95 Prozent der mobilen Geräte aufgespürt werden. Ein schneller Wechsel zwischen verschiedenen Zimmern oder auch nur ein kurzes Öffnen der Tür ohne Betreten des Raumes könnten hingegen die Detektion erschweren bzw. verhindern.

Bei der Abschätzung der Entfernung über die Signalstärke konnten [FELD03] feststellen, dass der RSSI-(Radio Signal Strength Indicator) Wert der eingesetzten Hardware nur für die Bestimmung einer Entfernung von bis zu 8 Metern sinnvoll eingesetzt werden kann. Die auf den so ermittelten Distanzen aufbauende Triangulation zur Berechnung der Position erzielte jedoch anschließend eine Positionsgenauigkeit von 2,08 Metern.

4.3.2 Motorisierter Individualverkehr

Verkehrskenngrößen: Reisezeitschätzung und Verlustzeitenbestimmung

Seit dem Jahr 2008 liegt der Forschungsschwerpunkt bei der Erfassung des motorisierten Individualverkehrs mit Bluetooth auf der Ermittlung von Reisezeiten.

Forscher der Purdue Universität und des Indiana Department of Transportation [ITEJ08] haben dazu Anfang des Jahres 2008 ein erstes System entwickelt, das auf Basis der im Fahrzeug mitgeführten Bluetooth-Geräte Reisezeiten abschätzt.

Mit Hilfe der an Verkehrsknotenpunkten installierten Detektoren werden die MAC-Adressen aktivierter, bluetoothfähiger Geräte erfasst und gespeichert. Anhand der Wiedererkennung an weiteren Beobachtungspunkten kann schließlich ermittelt werden, wie viel Zeit das entsprechende Gerät und damit das Fahrzeug, indem es sich befindet, benötigt hat, um die Strecke zwischen beiden Detektoren zu bewältigen. Darüber hinaus können auch Verlustzeiten bestimmt werden, indem die Reisezeiten verschiedener Fahrzeuge, die etwa zur gleichen Zeit den entsprechenden Abschnitt passiert haben, gegeneinander abgeglichen werden bzw. indem die benötigte Reisezeit der im Idealfall anzunehmenden theoretischen Reisezeit gegenübergestellt wird. Bedingung für eine zuverlässige Auswertung der Verkehrssituation und Abschätzung von Reise- bzw. Verlustzeiten ist, dass genügend Messwerte, d.h. Erkennungen, vorliegen: „Ein Maß für die Eignung der Bluetooth-Technologie ist die Zahl der in einem Zeitintervall gelieferten validen Reisezeitwerte. Da diese nur bei einer Wiedererkennung eines Fahrzeuges bzw. Bluetooth-Gerätes berechnet werden können, muss die Anzahl der Wiedererkennungen hinrei-

chend groß sein“ [HOYE11]. Vorteil der Bluetooth-Technologie ist diesbezüglich deren mittlerweile große Verbreitung – neben Mobiltelefonen können drahtlose Kopfhörer, kabellose Tatstaturen, Bluetooth-vernetzte mobile Geräte wie PDA oder Laptop, aber auch Freisprecheinrichtungen, Navigationsgeräte und Autoradios Daten liefern sofern die in ihnen integrierte Bluetooth-Schnittstelle aktiviert ist.

Für den Feldtest in Indianapolis wurden die Bluetooth-Erfassungseinrichtungen, die mit einer einfachen Stabantenne ausgerüstet wurden, entlang sog. state roads (außerörtliche Straßen; vergleichbar mit Bundes- oder Fernverkehrsstraßen in Deutschland) temporär installiert. Insgesamt wurden zwei verschiedene Feldtests durchgeführt – zum Einen zwischen dem 30. Januar und dem 1. Februar 2008 auf einem ca. 9 km langen Autobahnabschnitt, zum Anderen vom 16. bis zum 21. Februar 2008 auf einem ca. 14 km langen Abschnitt einer Schnellstraße, die acht lichtsignalgesteuerte Knotenpunkte einschließt. Die aufgenommenen Daten beinhalteten die MAC-Adresse sowie den jeweils dazugehörigen Zeitstempel. Anhand der Differenzen der Zeitstempel, die sich aus der Wiedererkennung an mehreren Detektionsstandorten ergaben, erfolgte schließlich die Schätzung der Reisezeit. [ITEJ08]

Anhand der in Indianapolis durchgeführten Messungen wurde festgestellt, dass die auf der Schnellstraße mit Knotenpunkteinfluss aufgenommenen Daten eine wesentlich stärkere Varianz aufgrund der Lichtsignalanlagen und den vielfältigeren Möglichkeiten zum Ändern der Fahrtroute an den Abzweigen aufweisen. Dennoch zeigten die Untersuchungen auch, dass Reisezeiten und deren Trends trotz erhöhter Varianzen auf Basis erfasster MAC-Adressen gut erkennbar sind. [ITEJ08]

Mit dem Prototyp des Systems konnten während der beiden Feldversuche etwa 1,2 Prozent des Verkehrs registriert werden – dies entsprach einer Erfassung jedes hundertsten Fahrzeuges. [ITEJ08]

Trajektorien: Erstellung von Bewegungsprofilen

Trajektorien beschreiben das zeitliche und räumliche Verhalten eines punktförmigen Körpers durch eine Raumkurve und stellen somit Bewegungspfade bzw. -profile eines Objektes dar. Im Verkehrswesen verdeutlichen Trajektorien die Bewegung eines Fahrzeuges über die komplett durchfahrene Strecke und bilden damit dessen streckenbezogenes Verhalten ab. Trajektorien können somit nur erhoben werden, indem ein Fahrzeug anhand eindeutig identifizierbarer Merkmale über mehrere Streckenabschnitte hinweg quasi verfolgt wird. Rein querschnittsbezogene Messwerterfassungssysteme, die auf allgemein gültige Fahrzeugcharakteristiken (wie z.B. metallische Masse, Wärme oder Licht) reflektieren, sind nicht in der Lage Daten zur Generierung von Trajektorien zu liefern. Zur Anwendung kamen daher bisher einerseits Kennzeichenerfassungen per manueller Zählung oder automatisch über Kamerasysteme mit entsprechender Auswertungssoftware und andererseits moderne Detektionsmethoden wie Floating Car Data, die aufgrund einer zusätzlichen Fahrzeugausstattung eindeutig zuzuordnende Messdaten lieferten. Die-

sen Systemen ist jedoch einerseits ein erheblicher Aufwand, andererseits eine hohe Kostenintensität bei der Ermittlung der gewünschten Messwerte gemeinsam. [BUHL07]

Die mit dem Messprinzip der Bluetooth-Technologie verbundene eindeutige Identifizierbarkeit einer spezifischen MAC-Adresse bzw. des dazugehörigen Gerätes respektive Nutzers erlaubt ebenfalls eine Wiedererkennung des jeweiligen Gerätes an verschiedenen Messstandorten. Auf Basis dessen können zum Einen wie bereits beschrieben Reisezeiten ermittelt werden. Werden die MAC-Adressen jedoch nicht nur zwischen zwei Standorten verglichen und ausgewertet sondern über eine Vielzahl von Messpunkten, sind zum Anderen auch die Verfolgung dieser MAC-Adresse entlang eines Pfades und damit die Erstellung von Trajektorien möglich.

Aus Trajektorien sind zahlreiche verkehrstechnische Größen ableitbar, die Auskunft über die Belastung der Zuflüsse zu Kreuzungen, dem Abbiegeverhalten der Fahrzeuge und der allgemeinen Verkehrslage geben. Darüber hinaus ermöglichen Trajektorien die Ableitung von Quelle-Ziel-Relationen. Trajektorien sind daher entsprechend wertvoll für verkehrstechnische Steuerungssysteme. [BUHL07]

Aufgrund der datenschutzrechtlichen Bedenken hinsichtlich einer möglichen Zuordnung zwischen MAC-Adresse und der Person des Nutzers insbesondere auch aus Bewegungsprofilen heraus ist die Verwendung der Bluetooth-Technologie in diesem Zusammenhang mit äußerster Vorsicht zu behandeln.

4.3.3 Öffentlicher Verkehr

Besetzungsgrade: Erfassung von Fahrgastströmen

Um Erkenntnisse über die Belegung und die Auslastung von Fahrzeugen im öffentlichen Verkehr zu gewinnen und damit eine gute ÖV-Versorgung sowie einen wirtschaftlichen Einsatz der zur Verfügung stehenden Mittel sicherzustellen, ist vor allem die Sammlung von Informationen über das Verkehrsverhalten der Fahrgäste und über den Verlauf der Auslastung der Fahrzeuge für die Betreiber und Planer öffentlicher Verkehrsmittel eine wichtige Aufgabe. Genaue Daten über Fahrgastaufkommen, Reisewege und Fahrtweiten, Umsteigeverhalten sowie bevorzugte Pfade und Stationen bilden die Grundlage für Prognoseverfahren zur Planung und Optimierung der öffentlichen Verkehrssysteme. Bislang wurden solche Informationen über Befragungen gewonnen. Diese Art der Datengewinnung ist jedoch einerseits personalintensiv und damit kostenaufwändig, andererseits bilden die so erhobenen Daten nur eine Momentaufnahme ab. Ein besonderes Interesse der Betreiber besteht daher in der Installation automatischer Fahrgastzählssysteme mit deren Hilfe eine kostengünstige Dauerzählung zur Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Belastung möglich wird. Solche automatischen Systeme zur Erfassung der Fahrgastströme beruhen beispielsweise auf Trittkontakten, Lichtschranken, Ultraschall- oder Infrarotsensoren, die sich zumeist in den Eingangsbereichen der Fahrzeuge befinden. [FALL08]

Ebenfalls eine Möglichkeit zur automatischen Fahrgastzählung bietet die Anwendung von Bluetooth. Hierbei werden die Sensoren an den Decken im Inneren der Verkehrsmittel montiert. Auch in diesem Fall basiert die Funktionsweise auf der permanenten Suche nach mobilen Geräten mit aktivierter Bluetooth-Schnittstelle, die die Fahrgäste mit sich führen. Sobald ein entsprechendes Gerät erfasst wird, werden dessen MAC-Adresse, Zeitstempel und Ein- und Ausstiegshaltestelle sowie fahrzeugseitige Informationen wie die Liniennummer, Fahrzeugnummer, Fahrtrichtung etc. gespeichert.

Ein entsprechendes System namens ‚PARSON‘ wurde bereits von der Fa. ccom GmbH entwickelt und befindet sich seit Anfang 2007 bei den Grazer Verkehrsbetrieben kontinuierlich im Einsatz. Das System stellt ein Sensornetzwerk bestehend aus insgesamt 130 Terminals dar, die in den Deckenwölbungen von Straßenbahnen und Bussen verbaut wurden. Je nach Bauweise besteht bei diesen Sensoren zudem die Möglichkeit über GPS die aktuelle Position und Geschwindigkeit des Fahrzeuges zu bestimmen und den Sensor an das Haltestellen-Informationssystem des jeweiligen Verkehrsbetriebes anzuschließen. Zur Abdeckung eines Busses reicht die Montage eines einzigen Terminals, in Straßenbahnen werden meist zwei Sensoren benötigt. Die damit erfassten Adressen der mobilen Geräte der Fahrgäste werden verschlüsselt und auf dem Sensor zunächst lokal gespeichert. Die Übertragung der gesammelten Daten über das PARSON Netzwerk auf einen zentralen Server kann dann schließlich je nach Konfiguration nach Dienstschluss in den Betriebshöfen und Werkstätten oder auch per Funkübertragung mittels GPRS in festen Intervallen (1 Minute bis 1 Stunde), zu festgesetzten Zeitpunkten, während der Aufenthaltsdauer an einer Haltestelle, an speziellen Punkten im Netz oder auch nach Anforderung durch den Server erfolgen. Um die zu übertragende Datenmenge vorab zu reduzieren, werden die Rohdaten vorbehandelt. Ziel dieser Vorbehandlung ist die Bereinigung der Daten im Hinblick auf die Filterung derjenigen Bluetooth-Adressen, die sich tatsächlich innerhalb des Fahrzeuges befunden haben. Mit Hilfe geeigneter Algorithmen können so Störeinflüsse, wie z.B. wartende Passagiere im Haltestellenbereich, Fahrradfahrer und Fußgänger etc. verworfen werden. Um solche Störeinflüsse auch im Voraus möglichst gering zu halten, erfolgt die Datenaufnahme zudem nur während der Fahrt zwischen den Haltestellen. Erst nach der Bereinigung werden die Daten in einer Datenbank zusammen mit einem Zeitstempel, der Liniennummer etc. und ggf. Geschwindigkeit und Position des Fahrzeuges gespeichert. [FALL08], [PARS08]

Auf Basis der Serverdaten können schließlich statistische Analysen und verschiedene grafische oder auch tabellarische Auswertemöglichkeiten generiert werden. So können die Anzahl ein- und aussteigender Fahrgäste an Haltestellen, das Umsteigeverhalten, Reisezeiten- und Fahrtweitenverteilungen oder auch der Längsschnitt der Fahrgäste einer Linie untersucht werden. Ein Vorteil der automatischen Erfassung von Fahrgastströmen mittels Bluetooth liegt diesbezüglich vor allem in der Möglichkeit aufgrund der eindeutigen MAC-Adresse Quelle-Ziel-Analysen durchzuführen, die mit reinen Ein- und Ausstiegszählungen nicht realisiert werden können. Die Erfassung von Quelle-Ziel-Beziehungen und damit verbunden auch die Verflechtung der Wege über verschiedene Linien ermög-

licht wesentlich differenziertere Aussagen über die Verteilung der Fahrgastströme im Netz und bildet somit die Grundlage für eine bedarfsgerechte Planung und Optimierung des öffentlichen Verkehrs z.B. bzgl. des Fahrzeugeinsatzes und der Linienführung. Lange Erhebungszeiträume erlauben zudem eine Differenzierung der Verkehrsnachfrage nach unterschiedlichen Zeiträumen (Stunden, Wochentage, Monate etc.) und gestatten so eine Reaktion auf mögliche Verlagerungswirkungen in der Nachfrage der Fahrgäste. [FALL08]

Da die erfassten Daten der aktivierten Bluetooth-Einheiten nur eine Stichprobe der tatsächlichen Anzahl der Fahrgäste darstellen, erfolgt zur Ermittlung des wirklichen Nachfrageteils und zur Kalibrierung des so aufgestellten Verkehrsmodells eine Hochrechnung der Fahrgastzahlen anhand parallel durchgeführter Querschnittszählungen der ein- und aussteigenden Fahrgäste. Über den Abgleich mit anderen automatischen Fahrgastzählungen sowie manuellen Zählungen konnte so beim Einsatz in den Grazer Verkehrsbetrieben ca. ein Jahr nach Inbetriebnahme des Systems eine errechnete Erfassungsquote von etwa 7 Prozent der Fahrgäste mit steigender Tendenz festgestellt werden. [HAGE08], [FALL08]

Fahrplaninformationen: Anschluss an rechnergestützte Betriebsleitsysteme

Nicht nur die Erfassung von Informationen zu Fahrgastströmen und Besetzungsgraden kann mit Hilfe der Bluetooth-Technologie vollzogen werden, sondern auch die Weitergabe von Fahrplanauskünften an die Fahrgäste im Sinne eines verbesserten Leistungsangebotes.

Das Wissen über den Aufenthaltsort eines Fahrzeuges erlaubt es, entsprechende Fahrgastinformationen in Echtzeit zu erzeugen und diese an den Haltestellen den potentiellen Fahrgästen zur Verfügung zu stellen. Die Weitergabe solcher Informationen erfolgt bisher über an den Haltestellen installierte digitale Abfahrtsanzeiger, die über spezielle Systeme, die sog. rechnergestützten Betriebsleitsysteme (kurz RBL; bzw. seit 2005 durch ITCS - Intermodal Transport Control System ersetzt) mit den entsprechenden Daten versorgt werden. Diese Systeme steuern die Informations- und Kommunikationsmöglichkeiten zwischen dem Fahrzeug und der Leitstelle, unterstützen den Fahrbetrieb z.B. bei der Anmeldung an Lichtsignalanlagen und erzeugen darüber hinaus die benötigten dynamischen Fahrgastinformationen auf Basis echter Fahrzeiten. Den Fahrgästen können so in Echtzeit beispielsweise verbleibende Minuten bis zum Eintreffen des jeweiligen Fahrzeuges einschließlich der dazugehörigen Liniennummer, Verspätungen oder auch Störungsfälle und Fahrplanänderungen übermittelt werden. Die Darstellung solcher Echtzeitinformationen sowie die permanente Aktualisierung bietet so den Fahrgästen eine wesentlich höhere Informationsdichte und steigert die damit verbundene Attraktivität des Verkehrsmittels.

Auch hier ist eine Erweiterung dieses Leistungsangebotes im Hinblick auf die Nutzung der Bluetooth-Schnittstelle möglich. So können in diesem Zusammenhang die entsprechen-

den Informationen per Bluetooth auch auf das Handy des Fahrgastes projiziert werden, sodass sie dieser über die Haltestelle hinaus zur Verfügung hat und portabel mit sich führen kann. Neben reinen haltestellenbezogenen Auskünften können darüber Fahrpläne, Linieninformationen und andere relevante Hinweise übermittelt werden. Ein weiterer Aspekt im Sinne der Erhöhung der Nutzerfreundlichkeit besteht zudem hinsichtlich der Einbindung von Senioren und sehbehinderten Menschen in den öffentlichen Nahverkehr. Diese können die an den Haltestellen angezeigten, rein visuellen Informationen oftmals nicht oder nur schwer lesen und bedürfen daher akustischer Auskünfte. In mehreren Versuchseinsetzen in Städten wie Kiel, Flensburg und Neumünster wurde bereits ein solches akustisches Informationssystem namens ‚mAIS‘ (mobiles Automatisches Informationshilfe System) auf Bluetooth-Basis getestet. Dieses System beinhaltet eine an jeder Haltestelle installierte Bluetooth-Bake, über die einerseits der Standort des Fahrgastes erkannt wird und die andererseits mit dem RBL des jeweiligen Verkehrsbetriebes in Verbindung steht. Über ein seniorenrechtliches, Bluetooth-fähiges Handy wird per Tastendruck der Standort bzw. die damit verbundene Haltestelle des Fahrgastes ermittelt. Anschließend erhält der Nutzer die Informationen der jeweiligen Haltestelle als Sprache, Schrift oder Vibrationsmuster auf sein Handy und kann diese individuell abrufen. [MUTZ07]

Eine Ausweitung dieses Prinzips auf die generelle Verfügbarkeit für jeden Fahrgast ist ohne Weiteres möglich sofern der Nutzer ein Handy mit Bluetooth-Schnittstelle besitzt. Darüber hinaus können auch die Verkehrsmittel selbst mit solch einem System ausgestattet werden, sodass der Fahrgast auch während der Fahrt Informationen beispielsweise zu nächsten Haltestellen, Umsteigemöglichkeiten und Abfahrtszeiten sich anschließender Linien etc. abrufen kann.

E-Ticketing: Handy als elektronischer Fahrschein

Bei E-Tickets handelt es sich um elektronische Tickets, die als Alternative zu Fahrscheinen in Papierform Anwendung finden. Der eigentliche Fahrschein entspricht beim E-Ticket einem Datensatz, der beispielsweise auf dem Handy oder einer Chipkarte in verschlüsselter Form gespeichert ist und per elektronischem Lesegerät mit Sicherheitsmodul (Secure Application Module) auf seine Echtheit überprüft werden kann. Solche E-Tickets kommen überwiegend im Bereich der Luftfahrt für Flugtickets, aber auch im ÖPNV oder als Eintrittskarten bei Großveranstaltungen wie z.B. Messen zum Einsatz.

Der Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) hat zwischen 2002 und 2005 einen Daten- und Schnittstellenstandard, die sog. VDV-Kernapplikation, für alle Formen eines elektronischen Tickets im öffentlichen Personenverkehr entwickelt, der die Kundenschnittstellen der einzelnen Ausprägungsstufen des elektronischen Fahrgeldmanagements (EFM) – d.h. bargeldloses Bezahlen, elektronischer Fahrschein, automatisierte Fahrpreisfindung – unabhängig von den Tarifsystemen verschiedener Verkehrsbetriebe vereinheitlicht und somit eine gegenseitige Interoperabilität herstellt. Mit einem solchen

Standard werden für den Nutzer sowohl durchgehende Reisen als auch punktuelle Einzelfahrten unter Benutzung derselben Applikation in den Netzwerken aller vertraglich eingebundenen Betreiber realisierbar, da die Schnittstellen zwischen Nutzermedium und auslesendem Terminal eindeutig spezifiziert und die Daten somit gleichartig interpretiert und benutzt werden. Als Nutzermedien können Geldkarten, Kundenkarten der jeweiligen beteiligten Verkehrsunternehmen, Handy-SIM-Karten sowie andere intelligente Geräte mit leistungsfähigem Mikroprozessorchip sowie standardisierten kontaktbehafteten oder kontaktlosen Schnittstellen fungieren. Auch Mobiltelefone können eingebunden werden. [VDVE05]

Beispiele für solche E-Ticketsysteme existieren mittlerweile vielfach. So kommen derzeit kontaktlose Systeme, wie z.B. die sog. Handy-Tickets, bei 34 Nahverkehrsanbietern aus 14 Verbänden bzw. Regionen, wie Rhein-Ruhr, Hamburg und Nürnberg zum Einsatz. Hierbei können die Fahrgäste ihre Tickets über das Handy per Java-Programm, SMS, kostenlosem Telefonanruf bzw. bei Smartphones auch per iPhone-Applikation oder mobilem Internet beziehen [BONN08]. Im Verbund KreisVerkehr Schwäbisch Hall kommen dagegen kontaktbehaftete Systeme zum Einsatz. Die Kunden besitzen dabei Chipkarten, die sog. KolibriCard, die am Ein- und Ausgang des jeweiligen Verkehrsmittels jeweils an ein Terminal gehalten werden muss – beim Einsteigen erfolgt darüber der Check-In in das System, beim Aussteigen entsprechend der Check-Out (auch als CICO-Verfahren bezeichnet). [KOLI11]

Ein weiterer Ansatz besteht zudem in der Raumerfassung bzw. der Be-In/Be-Out-(BIBO) Erkennung von Fahrgästen. Solche Systeme basieren auf einer passiven Anwesenheitserkennung von aktiven, d.h. mit eigener Stromversorgung versehenen Medien, die die Überbrückung der Funkstrecke zwischen Fahrzeug und Kundenmedium erlauben. Bisherige Pilotprojekte erfolgten in der Schweiz im Rahmen des Projektes „Easy-Ride“ sowie in Dresden innerhalb des Projektes „intermobil“, bei dem das sog. „ALLFA“-Ticket getestet wurde. Das Allfa-Ticket entspricht einer etwa kreditkartengroßen Chipkarte mit integriertem Display, Bedientasten sowie eigener Stromversorgung für die Sende- und Empfangstechnik. Vorteil dieses Verfahrens ist, dass der Fahrgast in keine aktive Interaktion mit dem System treten muss, sondern das Fahrzeug mit einem raumerfassenden Lesegerät ausgestattet ist, das sich nach jeder Abfahrt von einer Haltestelle selbstständig mit den im Fahrzeug befindlichen Chipkarten verbindet und den entsprechenden Fahrabschnitt abbucht. [KOST06], [IMDD05]

Auch im Hinblick auf das E-Ticketing ist der Einsatz von Bluetooth denkbar. Bei den oben beschriebenen Ansätzen ist insbesondere die Raumerfassung, also das BIBO-Konzept, einerseits für den Fahrgast aufgrund der Bequemlichkeit und andererseits auch für den Betriebsablauf, der beim CICO-Verfahren erheblich gestört werden kann, die optimale Lösung. Da jedoch die Technik der BIBO-Chips bei flächendeckender Einführung sehr teuer ist (Kostenpunkt etwa 10 bis 15 Euro) [KOST06], ist eine kostengünstige Alternative, wie sie die Bluetooth-Technologie bietet, erstrebenswert. Die eindeutige MAC-Adresse eines

Mobiltelefons sowie der Fakt, dass ein Mobiltelefon zumeist von ein und derselben Person genutzt wird, erlauben eine eindeutige Identifikation des Fahrgastes. Voraussetzung für die Nutzung des E-Ticketings wäre in diesem Fall eine vorherige, einmalige Anmeldung der MAC-Adresse des Kunden-Handys im System des Verkehrsbetriebes, d.h. der Kunde muss vorab der Erfassung und Nutzung seiner MAC-Adresse im Sinne der Verwendung des E-Ticketings zustimmen. Über die Ausrüstung der Verkehrsmittel mit Bluetooth-Baken, die regelmäßig zwischen den Stationen die MAC-Adressen der im Fahrzeug befindlichen Handys mit aktivierter Bluetooth-Schnittstelle detektieren, können dann per Datenbankabgleich die gefahrenen Fahrabschnitte dem jeweiligen Fahrgast zugeordnet und später auf elektronischem Weg abgerechnet werden.

4.3.4 Verkehrsmanagement

Verkehrssteuerung: individuelle Übertragung von Verkehrsinformationen

Ein entscheidender Faktor für das Funktionieren von Verkehrssteuerungsmaßnahmen im Sinne des operativen Verkehrsmanagements stellt die Weitergabe von Informationen an die Verkehrsteilnehmer dar.

Traditionell kommen hierbei punktuell wirksame Anlage, wie Schilderbrücken oder auch dynamische Wechselzeichenanlagen, zum Einsatz. Manko dieser Anlagen ist die relativ kurze Zeitspanne, die zur Weitergabe von Informationen zur Verfügung steht – insbesondere, wenn es sich um (Stadt-) Autobahnen oder sonstige Straße mit höheren gefahrenen Geschwindigkeiten handelt – weiterhin kann mit dieser Art von Hinweisgeber nur eine sehr begrenzte Anzahl von Informationen übermittelt werden ohne den Verkehrsteilnehmer in seinem Aufnahmevermögen hinsichtlich verkehrsrelevanter Mitteilungen zu überfordern.

Eine Alternative zu den generellen, für alle Verkehrsteilnehmer gleichermaßen zugänglichen Verkehrsinformationen könnten individuelle Verkehrshinweise via Bluetooth darstellen. Die Idee dahinter sieht die Installation eines auf Bluetooth basierenden Baken-systems vor, das an mit Bluetooth-Geräten ausgestattete Verkehrsteilnehmer beispielsweise aktuelle Verkehrslageinformationen, Stauwarnungen, Hinweise zu Unfällen, Bau-stellen oder Sperrungen bei Veranstaltungen, Empfehlungen bzgl. Umleitungen und Um-fahrungen oder auch Informationen über vorhandene Park-and-Ride-Möglichkeiten und deren Kapazitäten sowie weiterführend ÖV-Abfahrtszeiten etc. weitergibt. Diese Infor-mationen wären nach Übermittlung z.B. auf das mit einer Bluetooth-Schnittstellen ver-sehene Navigationsgerät dauerhaft bzw. solange wie der Nutzer die Informationen benö-tigt verfügbar. Ein weiterer Vorteil bestünde darin, dass die übertragenen Informationen wesentlich umfangreicher sein könnten. Perspektivisch gesehen wäre hierbei auch eine anschließende Einbindung der für den jeweiligen Verkehrsteilnehmer relevanten Infor-mationen in die Routenempfehlung des Navigationsgerätes denkbar.

Ein damit einhergehendes Problem besteht jedoch in der Art und Weise der Übertragung von Daten mittels Bluetooth – erst wenn das entsprechende Gerät der Datenübertra-

gung aktiv zustimmt, kann die Übermittlung beginnen (siehe dazu auch Kapitel 3). Eine bloße Erkennung des Bluetooth-fähigen Gerätes reicht demnach bei dieser Anwendung nicht aus. Eine Applikation, die die entsprechenden Informationen übermittelt, müsste folglich zunächst das Einverständnis des Verkehrsteilnehmers einholen. In diesem Sinne besteht hier insbesondere Forschungsbedarf hinsichtlich der durch die Abfrageprozedur zusätzlich aufzuwendenden Zeit, da der von der Bluetooth-Bake abgedeckte Sendebereich nicht nur die Erkennung eines aktivierten Bluetooth-fähigen Gerätes ermöglichen muss, sondern die verfügbare Zeit auch dem Senden der Abfrage, der darauf folgenden Bestätigung bzw. Ablehnung sowie der sich eventuell anschließenden Datenübertragung zu genügen hätte.

Als Erweiterung des beschriebenen Ansatzes eines individuellen Informationssystems auf Bluetooth-Baken-Basis kann die Vereinigung dieses Verfahrens mit den Fahrplaninformationen rechnergestützter Betriebsleitsysteme des Öffentlichen Verkehrs (ÖV) gesehen werden. Diese Zusammenführung beider Anwendungen im Sinne eines verkehrsträgerübergreifenden Systems würde beispielsweise auf den Zufahrten zu größeren Städten die Übermittlung von Empfehlungen zu Park-and-Ride-Möglichkeiten sowie dazugehörigen Hinweisen bzgl. weiterführender Verkehrsmittel und deren Abfahrtszeiten genauso wie Informationen zu ggf. vorhandenen innerstädtischen Umweltzonen oder sonstigen Beschränkungen beinhalten, die an im Fahrzeug befindliche Handys oder Navigationsgeräte gesendet werden können.

Verkehrslage: Ermittlung der Verkehrsstärke

Trotz der bestehenden zeitlichen Problematik bei der zuvor beschriebenen möglichen Anwendung im Hinblick auf ein individuelles, bluetooth-basiertes Verkehrsinformationssystem, kann Bluetooth für das Verkehrsmanagement zumindest als Einrichtung zur Erfassung der Verkehrslage ohne Weiteres Anwendung finden.

Die Eignung zur Abschätzung der vorliegenden Verkehrssituation mittels Bluetooth wurde bereits in Abschnitt 4.2.3 bestätigt. Die Erfassung eines gewissen Prozentsatzes der mit einem Bluetooth-Gerät ausgestatteten Fahrzeuge am Gesamtverkehr genügt, um hinreichend präzise Aussagen bzgl. der tatsächlichen Verkehrslage zu treffen. So konnte die schon erwähnte Untersuchung der University of Maryland Anfang des Jahres 2008 nicht nur zeigen, dass die Erfassungsdichte von Fahrzeugen, die ein in irgendeiner Form geartetes, aktiviertes Bluetooth-Gerät mitführten, nicht nur zur Ableitung von Reisezeiten auf bestimmten Streckenabschnitten, ausreichte, sondern auch die Abschätzung der Varianz des Verkehrsstroms ermöglichte. Mit einer Ausstattungsrate von etwa 1 von 20 Fahrzeugen sei laut [MARY08] eine hoch genaue Abschätzung des Verkehrszustandes möglich.

Die Schätzung der Verkehrsstärke kann einerseits auf der Basis der gefahrenen Geschwindigkeiten erfolgen, da der Grad des Verkehrsaufkommens im direkten Zusammenhang zur Geschwindigkeit der Fahrzeuge steht. Andererseits kann auf Basis der er-

fassten Stichprobe eine Hochrechnung erfolgen – dafür muss jedoch zunächst der Einsatzort vorab zumindest einmal kalibriert werden, um die Quote zur Hochrechnung auf die tatsächliche Verkehrsstärke zu bestimmen. In verschiedenen Untersuchungen zum Einsatz des bluetoothbasierten Sensorsystems ‚BLIDS‘ [WEIN11] konnte diesbezüglich festgestellt werden, dass sich die Quote über verschiedene Tage und Tageszeiten nur marginal verändert und somit von einer Unabhängigkeit gegenüber der Verkehrsstruktur (Zusammensetzung des Verkehrs) an verschiedenen Tagen ausgegangen werden kann. Auch eine Abhängigkeit der Quote von der Verkehrsdichte konnte in diesen Untersuchungen negiert werden, sodass es demzufolge möglich ist, für die Hochrechnung ein ganztägiges, lineares Regressionsmodell zu erstellen. [WEIN11]

Dennoch muss auch hier mit Toleranzen gerechnet werden – eine hundertprozentig genaue Hochrechnung ist mit dieser Art der Erfassung nicht zu realisieren. Anlass dafür ist vor allem die Qualität der zugrunde liegenden Daten: „Erst wenn dieses Datenmaterial bestimmte Eigenschaften aufweist, ist eine relativ genaue Schätzung der Verkehrsfrequenz möglich.“ Besonders wichtig ist in diesem Zusammenhang, dass die Stichprobe einer Normalverteilung genügt, da nur bei Vorlage dieser Verteilung von einer Stichprobe auf die Grundgesamtheit geschlossen werden kann. [WEIN11]

4.3.5 Verkehrsplanung

Origin-Destination-Matrizen: Ermittlung der Verteilung von Verkehrsströmen

Wie im Abschnitt 4.3.2 (Absatz Trajektorien) beschrieben, erlaubt die Nutzung der Bluetooth-Technologie im Sinne der Messwerterfassung im Verkehrsbereich die Erstellung von Trajektorien. Die Trajektorien wiederum verdeutlichen gleichzeitig die Quelle-Ziel-Relation eines spezifischen Fahrzeuges und können somit zur Erstellung von Origin-Destination- (Quelle-Ziel-)Matrizen verwendet werden.

Quelle-Ziel-Matrizen stellen eine wichtige Informationsquelle für die Identifizierung des Bedarfs an Verkehrsinfrastruktur dar und bilden damit eine wesentliche Grundlage für das Verkehrsbeeinflussungsmanagement und die Verkehrsplanung. Eine O-D-Matrix gibt die Verteilung des Verkehrs, d.h. beispielsweise die Aufteilung verschiedener Verkehrsströme an einer Kreuzung oder auch netzbezogen gesehen auf die verschiedenen, erreichbaren Regionen wider. Quelle-Ziel-Relationen anhand von Befragungen zu gewinnen, ist zeit- und kostenaufwändig - eine automatische Generierung daher von Vorteil. Wie bereits im Abschnitt der Trajektorien dargestellt, bietet ein System wie die Detektion mittels Bluetooth-Technologie, das auf Basis eines eindeutig identifizierbaren Merkmals automatisch in der Lage ist, solche Relationen zu ermitteln, erhebliche Vorteile für die Verkehrsplanung.

Mit den aus einer O-D-Matrix gewonnenen Informationen zur Verkehrsnachfrage Verkehrszustände im Untersuchungsnetz ermittelt und Bereiche mit hohen Belastungen identifiziert. Eine Quelle-Ziel-Matrix erlaubt somit Analysen hinsichtlich einer Überlastung des Verkehrsnetzes, von Stauzuständen und geeigneten Strategien zur Optimierung des

Verkehrsablaufs im Netz. Darauf aufbauend können schließlich wirksame Managementstrategien zur Herstellung eines stabilen Verkehrszustandes entwickelt werden. [WANG08]

Wie bereits unter dem Punkt ‚Trajektorien‘ angemerkt, bedarf auch die Erstellung solcher Quelle-Ziel-Matrizen aufgrund der Personalisierungsmöglichkeit auf Basis der erfassten MAC-Adressen der besonderen Beachtung datenschutzrechtlicher Belange.

Ganglinien: Ermittlung der Auslastung der Verkehrsanlagen über den Tag

Ganglinien stellen die Verteilung von Verkehrskenngrößen über den Tag dar und ermöglichen damit Aussagen zur Auslastung der Verkehrsanlagen während der verschiedenen Tageszeiten.

Voraussetzung für die Erstellung von Tagesganglinien sind wie bei der Schätzung der Reisezeiten und der Verkehrslage eine ausreichend große Anzahl vorhandener Messwerte. Ein Verkehrsdetektor muss demnach in der Lage sein, auch in Zeiten schwach ausgelasteter Verkehrswege hinreichend viele Daten zu erheben. Die mit Hilfe der Bluetooth-Detektion durchschnittlich erfassbare Menge an Messwerten genügt diesbezüglich den Anforderungen, wie in den zuvor aufgeführten Untersuchungen dargestellt werden konnte. So zeigten Untersuchungen der Universität Kassel im Rahmen eines Projektes zur Reisezeitbestimmung mittels Bluetooth-Technologie im August 2010 [HOYE11], dass Tagesganglinien der Erkennungsraten an verschiedenen Messstandorten Ähnlichkeiten mit Verkehrsstärkeganglinien aufweisen und somit unter Kenntnis der für die jeweilige Strecke geltenden Hochrechnungsfaktoren durchaus repräsentativen Charakter besitzen. In Spitzenzeiten wurden bis zu 65 verschiedene Bluetooth-Geräte pro Stunde bei diesen Messungen identifiziert – insgesamt streute die Erkennungsrate zwischen den verschiedenen Standorten zwischen 3 und 12 Prozent der Verkehrsstärke. Da für die Reisezeitbestimmung insbesondere die Wiedererkennung bestimmter Bluetooth-Geräte relevant ist, wurden bei diesen Untersuchungen auch die Wiedererkennungsraten zwischen den gewählten Messstandorten erhoben. Diese zeigten, dass es „durchaus Tageszeiten gibt, zu denen nur ein schwaches Angebot an Reisezeitmesswerten zu verzeichnen ist.“ Im Vergleich mit den reinen Erkennungsraten an den einzelnen Standorten wurde hierbei eine Diskrepanz zwischen der Erkennungs- und Wiedererkennungsrate festgestellt, deren Hauptursache jedoch in den auf der Versuchsstrecke vorhandenen Abzweigmöglichkeiten erkannt wurde. Vollständig aufgezeichnete Reisezeit-Tagesgänge vom 12.08.2010 in Kassel auf der Dresdner Straße verdeutlichen die zahlenmäßige Bandbreite der gemessenen Reisezeiten und sind auch in der Lage Reisezeitanstiege (siehe Abbildung 20) zwischen 16 und 17 Uhr) darzustellen, wobei bei den durchgeführten Messungen von keiner generellen Repräsentativität der Tagesgänge ausgegangen werden kann, da im Versuchszeitraum noch Schulferien waren. [HOYE11]

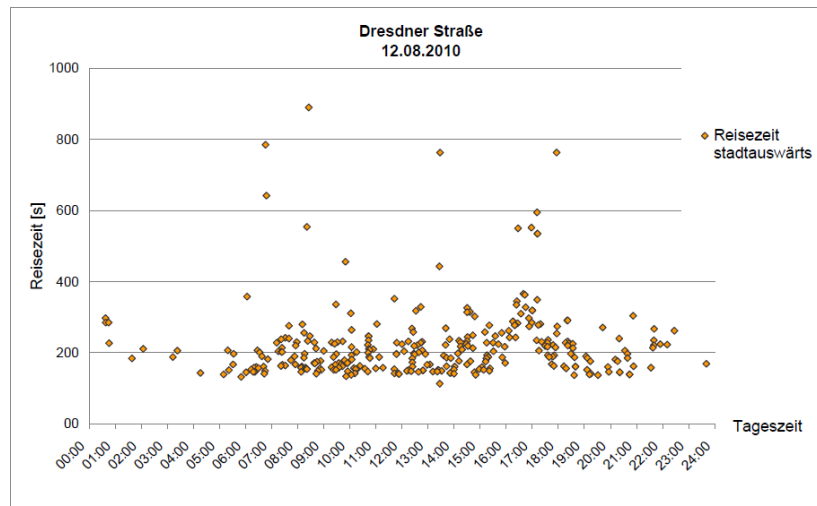


Abbildung 20: Reisezeitendaten auf Bluetooth-Basis [HOYE11]

Infrastrukturdimensionierung: Identifikation häufig genutzter Wege

Die Eignung der Bluetooth-Technologie im Sinne der Infrastrukturdimensionierung im Rahmen der Verkehrsplanung ergibt sich aus den bereits zuvor genannten Anwendungsszenarien. Über die Möglichkeit, Bewegungsprofile bestimmter MAC-Adressen erstellen zu können, können die Verteilung von Verkehrsströmen analysiert und darauf aufbauend häufig genutzte Wege identifiziert werden. Diese Eigenschaft der Detektion mittels Bluetooth kann wiederum im Bereich der Planung und Optimierung von Verkehrswegen, sei es im Straßenverkehrsbereich bei der Wahl geeigneter Straßenquerschnitte, bei der Planung von Umsteigewegen im ÖV, am Flughafen oder auch auf Messen und anderen Großveranstaltungen, zum Einsatz kommen.

Die Fähigkeit zur Ermittlung relevanter Verkehrskenngrößen, wie Verkehrstärke und Reisezeit, erlaubt hierbei zudem den Abgleich zwischen der maximalen Planungskapazität und der tatsächlichen Auslastung der betrachteten Verkehrsanlage. Erstellbare Ganglinien über den Tag, wochen- oder monatsbezogen etc. zeigen temporäre Engpässe. Auf Basis dessen sind schließlich Aussagen hinsichtlich des Bedarfs an Neu-, Um- oder auch Rückbauten möglich.

Die Bluetooth-Detektion bietet hierfür eine einfache, kostengünstige und schnell zu installierende Variante zur Überprüfung der Verkehrslage verbunden mit eindeutig identifizierbaren Quelle-Ziel-Relationen und stellt somit ein geeignetes Werkzeug für die Analyse notwendiger Eingriffe und des Bedarfs an Verkehrswegen im Bereich der Verkehrsplanung dar.

4.4 Fazit

Der in seinem Aufbau und seiner Funktionsweise vorgestellte Verkehrsdetektor auf Basis der Bluetooth-Technologie wurde eingehend hinsichtlich seiner qualitativen Eignung für den Einsatz im Verkehrsbereich analysiert und beurteilt. Es zeigte sich, dass der Blue-

tooth-Detektor trotz einiger Schwächen in der Lage ist, die generell an Erfassungssysteme gestellten Anforderungen zu erfüllen. Defizite sind derzeit noch in der Genauigkeit streckenbezogener Kenngrößen, wie Reisezeiten und Geschwindigkeiten, zu sehen. Insbesondere im Hinblick auf betriebliche Anforderungen konnten jedoch entscheidende Vorzüge bzgl. Montage und Instandhaltung gegenüber anderen Detektorsystemen nachgewiesen werden. Die schnelle und einfache Anbringung ohne zusätzliche, fahrzeugseitig zu installierende Einrichtungen eröffnet die Möglichkeit zum kurzfristigen Einsatz zum Beispiel zur temporären Erfassung von Trends an nicht regulär genutzten Strecken, die beispielsweise aufgrund von Bauarbeiten auf den Haupttrassen zu Umleitungszwecken genutzt werden, jedoch nicht mit automatischen Erfassungssystemen ausgestattet sind.

Im Weiteren erfolgte eine Analyse potentieller Einsatzbereiche. Getrennt nach verschiedenen verkehrstechnischen Anwendungsfeldern wurden bestehende Ansätze sowie weitere mögliche Einsatzfelder zur Verwendung der Bluetooth-Technologie im Verkehrsbe- reich aufgezeigt. Vorallem in der Erfassung von Verkehrsströmen (sowohl motorisierte als auch nicht motorisierte Ströme) sowie in der darauf aufbauenden Ableitung von Quelle-Ziel-Beziehungen und Bewegungsprofilen konnte ein großes Potential festgestellt werden.

5 Konzeptioneller Ansatz

Im folgenden Kapitel wird das entwickelte Konzept zur Durchführung der empirischen Untersuchung vorgestellt. Dafür wird zunächst der Untersuchungsgegenstand ausgehend von den im vorherigen Kapitel analysierten potentiellen Einsatzszenarien hergeleitet. Die Darstellung der empirischen Untersuchung im Sinne eines Prozesses bildet den Kern des Kapitels und beschreibt die einzelnen Schritte, die der Untersuchung zugrunde liegen. Das vorliegende Kapitel bildet damit den Übergang zum zweiten, empirischen Teil der Arbeit. Die Darstellung der Ergebnisse sowie deren Interpretation erfolgt dann im Anschluss in Kapitel 6.

5.1 Herleitung des Untersuchungsgegenstandes

Die im vorherigen Kapitel dargestellten Anwendungsszenarien bilden den Einsatz des Bluetooth-Verfahrens im vorrangig außerstädtischen Bereich ab. Die Eignung zur Verwendung der neuen Technologie im Rahmen der Detektion längerer, gerader Teilstrecken von Hauptverkehrsstraßen und Autobahnen konnte ohne eingehende Betrachtung der teilweise dazwischen liegenden Kreuzungen in anderen Forschungsprojekten und Untersuchungen bereits nachgewiesen werden. Es konnte gezeigt werden, dass die Leistungsfähigkeit der Bluetooth-Technologie durchaus genügt, um aktuelle Tendenzen im Verkehrsfluss korrekt abzubilden und damit eine schnelle und kostengünstige Erweiterung vorhandener Erfassungseinrichtungen vor allem auf weniger gut bzw. nicht ausgestatteten Umgehungs- und Ausweichstrecken zur Verfügung zu stellen. Siehe hierzu beispielsweise das Forschungsprojekt von [HOYE11] und Untersuchungen der Purdue University in Indianapolis [WASS09].

Um Aussagen zur generellen Eignung der Technologie über die außerstädtischen Anwendungsgebiete hinaus treffen zu können und somit einen globalen Einsatz des Verfahrens im Rahmen des Verkehrsmanagements und der Verkehrssteuerung aufzeigen zu können, soll in dieser Arbeit speziell die Eignung der Bluetooth-Detektoren für die innerstädtische Verwendung mit Fokus auf der Erfassung des Verkehrs an Kreuzungen bzw. im kreuzungsnahen Bereich untersucht werden. Die Erfassung des Verkehrs an urbanen Knotenpunkten stellt für das städtische Verkehrsmanagement einen wesentlichen Anwendungsfall dar. Kreuzungen bestimmen den innerstädtischen Verkehr maßgeblich, da sie das Verkehrsaufkommen einerseits strukturieren und damit flüssiger gestalten können, andererseits aber auch Engpässe darstellen, die unter Umständen zur Verlangsamung oder gar Störung des Verkehrs beitragen.

Ein wesentlicher Aspekt der Erfassung des Verkehrs an Kreuzungen stellt die Ermittlung der Verteilung der Verkehrsströme dar. Die Bestimmung der Aufteilungsfaktoren gibt einerseits Auskunft über die Quelle-Ziel-Beziehungen des Knotenpunktes selber sowie deren Ausprägung hinsichtlich des übergeordneten Verkehrsnetzes. Andererseits offenbaren sich anhand dessen wichtige Informationen über die Leistungsfähigkeit der Kreuzung. Darüber hinaus spielt auch die Ermittlung von Reise- bzw. Wartezeiten an Kreuzungen

eine entscheidende Rolle, da diese die aufgrund des zu passierenden Knotenpunktes entstandenen Verlustzeiten abbilden und somit den Einfluss der Kreuzung auf den Verkehrsfluss widerspiegeln.

Das Ziel der in dieser Arbeit durchgeführten empirischen Untersuchung besteht somit zusammengefasst darin, die Anwendbarkeit der Bluetooth-Detektion im Rahmen eines Versuchsaufbaus an einer innerstädtischen Kreuzung aufzuzeigen und damit die Eignung dieser Technologie bezogen auf ein städtisches Verkehrsmanagementsystem zu analysieren.

Für die empirische Analyse werden zunächst die erhobenen Bluetooth-Datensätze auf ihre Genauigkeit überprüft. Dies erfolgt über ein sog. Ground Truthing, bei dem mittels gleichzeitig erhobener Daten von Induktivschleifendetektoren ein Referenzdatensystem geschaffen wird. Solch ein Referenzsystem stellt eine Vergleichsmessung dar, die es ermöglicht, Aussagen über die Erkennungsrate der erhobenen Bluetooth-Daten gegenüber dem tatsächlichen Verkehrsaufkommen zu treffen und damit Kennzahlen für den Anteil der Erfassungsrate an der Gesamtverkehrsstärke abzuleiten.

Die sich daran anschließende Auswertung der Bluetooth-Datensätze soll darüber hinaus aufzeigen, welche Kenngrößen aus den erhobenen Daten extrahiert und inwieweit der Verkehrsablauf auf deren Basis beschrieben und beurteilt werden können. Der Fokus der Untersuchung liegt dabei auf der Bestimmung von Fahrzeugtrajektorien und Quelle-Ziel-Relationen sowie auf der darauf aufbauenden Erstellung von Origin-Destination-Matrizen. Abschließend werden mögliche Fehlerquellen diskutiert sowie Ansätze zur Verbesserung der Messergebnisse gegeben.

5.2 Herangehensweise an die empirische Untersuchung

Im Folgenden werden die Aktivitäten der im 6.Kapitel durchgeführten empirischen Untersuchung im Sinne einer Prozessdarstellung hergeleitet. Dementsprechend lässt sich die folgende Vorgehensweise auch auf die Validierung anderer Detektorarten übertragen, wobei zum Zwecke der Operationalisierung ein direkter Bezug zur Bluetooth-Technologie und den beim DLR vorgegebenen Rahmenbedingungen vorgenommen wird.

Die Vorgehensweise bei der empirischen Untersuchung dieser Arbeit erfolgt entsprechend der schematischen Darstellung in [Abbildung 21](#). Die Inhalte der dort aufgezeigten Schritte sowie deren Auswirkungen bezogen auf die vorliegende Untersuchung werden in den folgenden Unterkapiteln erläutert. Mit der Beschreibung der Inhalte der einzelnen Schritte wird der Prozess der Durchführung der empirischen Untersuchung vollständig dargestellt. Beginnend mit der Untersuchungsvorbereitung in Schritt 1 werden die im Vorfeld jeder Untersuchung notwendigen planerischen und organisatorischen Schritte aufgezeigt, die die Basis für alle weiteren Handlungen darstellen. Obligatorische prototypische Tests der verwendeten Technik folgen im Schritt 2. Die Schritte 3 und 4 enthalten dann die Festlegungen hinsichtlich der eigentlichen Datenerhebung sowie der sich daran anschließenden Datenaufbereitung. Im Schritt 5 wird abschließend

konzeptionell die Zielstellung der Datenauswertung dargelegt. Aufbauend auf dem in Schritt 5 beschriebenen Konzept erfolgen die eigentliche Auswertung der erhobenen Datensätze und der Referenzdaten sowie die Darstellung der daraus abgeleiteten Ergebnisse in Kapitel 6.

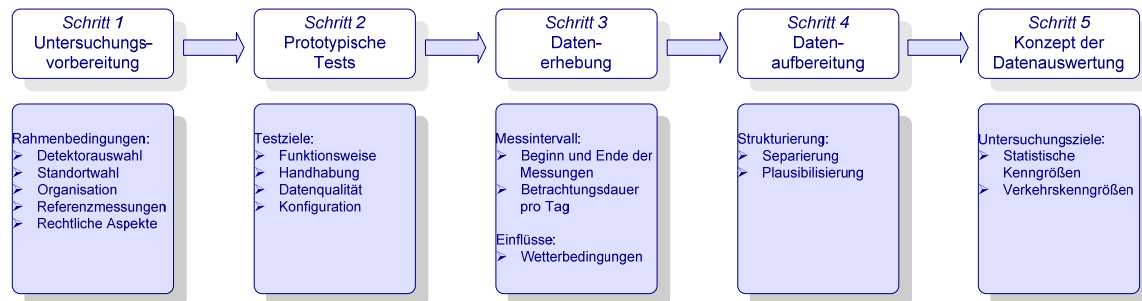


Abbildung 21: Schema zur Herangehensweise an die empirische Untersuchung

5.2.1 Untersuchungsvorbereitung

Vor der eigentlichen Untersuchung sind zunächst inhaltliche sowie organisatorische Aspekte zur Durchführung der Verkehrserhebung zu klären. So sind in der Vorbereitung die zur Erreichung des Erhebungszieles notwendigen Festlegungen zu treffen, die Messstandorte und die zur Anwendung kommenden Detektoren auszuwählen sowie die Geräte und die Datenspeicherung auf ihre Funktionstüchtigkeit hin zu überprüfen. Darüber hinaus sind begleitende Referenzmessungen sofern benötigt einzurichten und rechtliche Details, wie beispielsweise die Beantragung von Genehmigungen zu klären.

Zusammengefasst sind folgende Aspekte im Vorfeld einer Verkehrserhebung zu beachten, auf die im Weiteren näher eingegangen wird:

- Detektorauswahl,
- Standortauswahl,
- Prüfung der Funktionstüchtigkeit des Detektors und der Geräte,
- Organisatorische Rahmenbedingungen.

Einsatz der Bluetooth-Detektoren und Referenzdetektorwahl

Für die Untersuchung kommen in dieser Arbeit eigens beim Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt entwickelte Bluetooth-Detektoren mit autarker Stromversorgung zum Einsatz. Um Aussagen zur Qualität und Quantität der erhobenen Daten treffen zu können, werden diese den mittels Induktivschleifendetektoren erfassten Referenzdaten gegenübergestellt. Beide Erfassungssysteme sind in etwa an der gleichen Stelle anzubringen. Es wird daher die Wahl einer innerstädtischen Kreuzung anvisiert, an der Induktivschleifen bereits vorhanden sind. Um direkten Zugriff zu den so gewonnenen Referenzdaten zu erhalten, wird in diesem Fall idealerweise ein auf der Messstrecke des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt befindlicher Knotenpunkt für die Untersuchung

ausgewählt. An dieser Kreuzung sind darüber hinaus Messstellen ausfindig zu machen, an denen die neu zu installierenden autarken Bluetooth-Erfassungsgeräte positioniert werden können.

Standortwahl

Voraussetzung für die Positionierung der Bluetooth-Detektoren ist ein Mast in unmittelbarer Umgebung der Induktivschleifendetektoren, der sich aufgrund des vergleichsweise weiten Erfassungsradius der Bluetooth-Technologie soweit von der Kreuzungsmitte entfernt befindet, dass sich die Erfassungsradien der in den einzelnen Knotenpunktzufahrten angebrachten Detektoren nicht überschneiden. Dennoch muss dabei auch gewährleistet sein, dass mit den Detektoren nur die für die Kreuzung relevanten Verkehrsströme erfasst werden. Dies impliziert auch eine weitestgehende Unabhängigkeit von anderen Verkehrsteilnehmern, deren Erfassung mit Hilfe der Bluetooth-Technologie ebenfalls möglich, jedoch im Rahmen dieser Untersuchung nicht unbedingt erwünscht ist. Hierzu zählen Fußgänger, Fahrradfahrer sowie der Öffentliche Personennahverkehr (wie z.B. Busse), deren Erfassung zu einer Verfälschung der Messergebnisse führt.

Darüber hinaus ist die Wahl geeigneter Standorte von Gewicht, Befestigung und Stromversorgung des Detektors abhängig. Es sind daher Masten auszuwählen, deren Belastbarkeit für einen Detektor mit einem Gewicht von etwas mehr als 10 Kilogramm ausreichend ist. Zum Schutz vor Vandalismus und dem Zugriff Unbefugter sind die Detektoren an den Masten in einer Höhe von mindestens 3 Metern anzubringen, sodass nur entsprechend hohe Masten, die auch in dieser Höhe eine genügende Stabilität bieten, in Betracht gezogen werden können. Darüber hinaus ist der Abstand der gewählten Messstelle zur Fahrbahn bei der Detektion mittels Bluetooth von großer Bedeutung. Wie in Kapitel 4 dargestellt, bestimmt der seitliche Abstand die zur Erfassung vorhandene Zeitspanne entscheidend mit, sodass eine Positionierung mit möglichst geringem Abstand anzustreben ist. Neben den mechanischen Voraussetzungen sind zudem geometrische Bedingungen zu berücksichtigen. Diese betreffen das Erfassungsfeld des Detektors um den gewählten Standort. Bei der Montage am Mast sollte darauf geachtet werden, dass freie Sicht zum betrachteten Straßenquerschnitt besteht und der Wahrnehmungsbereich nicht durch etwaige Bebauung oder hineinragende Bepflanzung beeinträchtigt wird. Zudem ist bei der Anbringung am Mast und der Ausrichtung der Antenne darauf zu achten, dass keine bzw. möglichst wenig Abschattungseffekte insbesondere in Richtung des zu erfassenden Verkehrs auftreten können. Aufgrund der autarken Stromversorgung mit Bleiakkumulatoren und der direkten Speicherung der gewonnenen Daten auf einer internen Speicherkarte können die Detektoren ohne Verkabelung installiert werden - bei der Standortwahl muss daher nicht auf vorhandene elektrische Leitungen geachtet werden. Die Nummer der Detektoren an den entsprechenden Messstellen ist bei der Anbringung zu dokumentieren, sodass später eine eindeutige Zuordnung der gewonnenen Daten zu den Standorten erfolgen kann.

Die für diese Arbeit ausgewählte Kreuzung liegt im Südosten Berlin am Rande des Wissenschaftsstandortes Adlershof (Bezirk Treptow-Köpenick) und begrenzt die vom DLR mit verschiedenen Techniken der Verkehrserfassung ausgestattete Messstrecke am Ernst-Ruska-Ufer. Es handelt sich hierbei um eine doppelte T-Kreuzung, die an zwei Zufahrten mit vom DLR betriebenen Induktivschleifendetektoren ausgestattet und weitgehend unbeeinflusst von anderen Verkehrsteilnehmern (nur wenig Fußgänger und ÖPNV) ist. Abbildung 22 enthält eine skizzenhafte Übersicht dieser Kreuzung mit der ungefähren Lage der Messstellen.

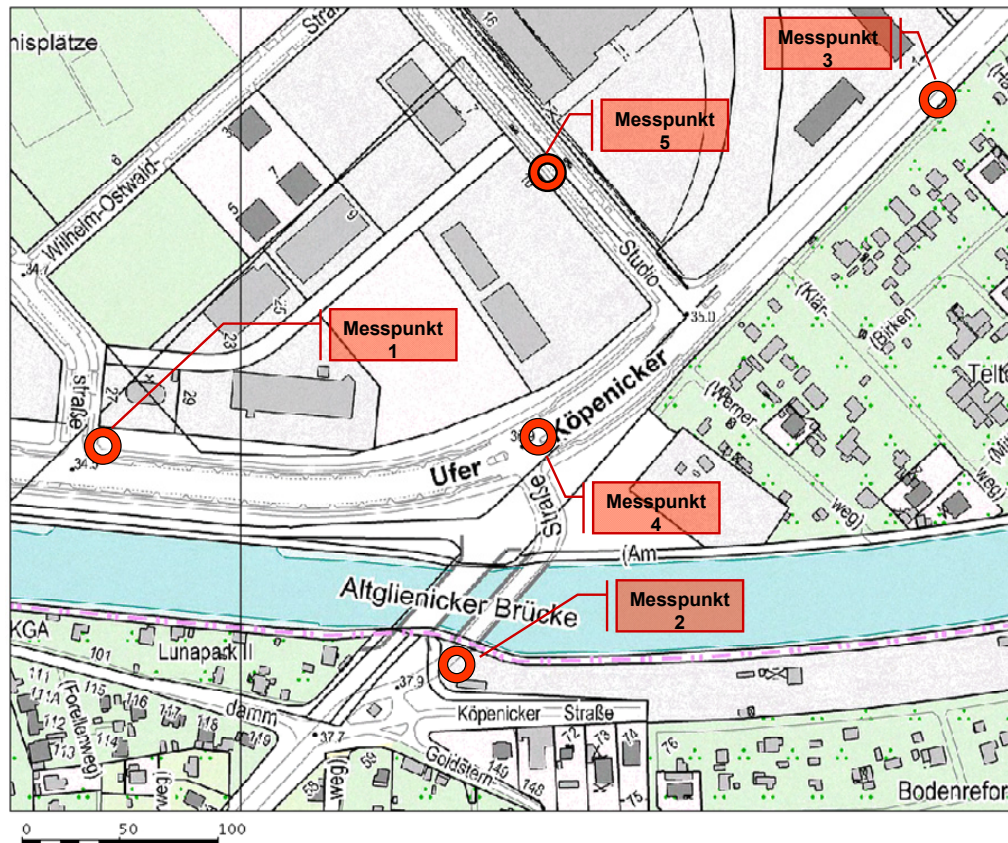


Abbildung 22: Übersichtskarte mit Messstandorten

Prüfung der Funktionstüchtigkeit

Als Grundvoraussetzung für die Durchführung der Messungen ist die Funktionstüchtigkeit der Geräte zu sehen. Diese ist vorab eingehend zu prüfen. Auch die Funktionstüchtigkeit der für die Referenzmessung zum Einsatz kommenden Induktivschleifendetektoren unterliegt dieser Prüfung.

Die Geräteprüfung impliziert insbesondere die korrekte Funktionsweise der integrierten Hardware (Mini-Rechner, Datenspeichermedium etc.) sowie der genutzten Software. Es ist dabei sicherzustellen, dass sämtliche Bestandteile bei der Montage am Mast vorhanden, korrekt installiert und einsatzbereit sind.

Um zu gewährleisten, dass die Detektoren über eine ganze Woche hinweg funktionsfähig sind, gilt es darüber hinaus vorab die zur Stromversorgung verwendeten Bleiakkumulatoren auf die Dauer ihrer Leistungsfähigkeit zu überprüfen. Für die vorliegende Untersuchung konnte so festgestellt werden, dass die zum Einsatz kommenden Akkus etwa über 5,5 Tage bei nahezu gleichbleibenden Temperaturbedingungen (tagsüber ca. 10°C – 15°C, nachts teilweise bis zu 0°C) Energie zur Verfügung stellen können. Eine optimale Nutzung der maximalen Laufzeit wird erreicht, wenn die Akkumulatoren erst kurz vor Beginn des angestrebten Messzeitraums eingesetzt werden.

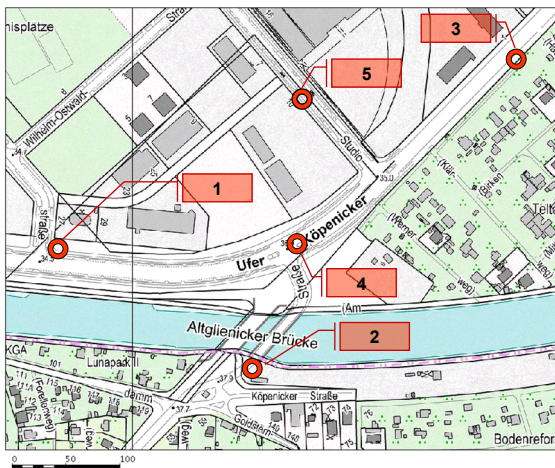
Organisatorische Rahmenbedingungen

Besonderes Augenmerk ist bei der Untersuchungsvorbereitung zudem auf organisatorische Aspekte, wie beispielsweise die Beantragung von Genehmigungen, zu legen. Die Abstimmung mit den zuständigen Behörden kann zeitintensiv sein und sollte daher rechtzeitig im Vorfeld der Untersuchung erfolgen. Bei der Nutzung von Lichtmasten ist die Sondernutzungserlaubnis für jeden einzelnen Lichtmast bei dem entsprechenden Betreiber einzuholen. An die Erteilung der Genehmigung können spezielle Auflagen geknüpft sein, die ebenfalls berücksichtigt werden müssen. Insgesamt besitzt das Genehmigungsverfahren bei der Standortauswahl das größte Gewicht, da nur die vom Betreiber als geeignet eingestuften Lichtmasten für die Durchführung der Messungen tatsächlich in Betracht kommen. Kann an einer Knotenpunktzufahrt kein geeigneter Standort gefunden werden, ist eine Alternative für die Anbringung des Detektors zu suchen.

Messtandortbeispiel

Im Folgenden wird ein auf Basis der zuvor genannten Voraussetzungen exemplarisch ausgewählter Messtandort vorgestellt. Alle weiteren Beschreibungen der verwendeten Messtandorte befinden sich als Steckbriefe innerhalb der Anlage I.

Steckbrief: 2. Messstandort

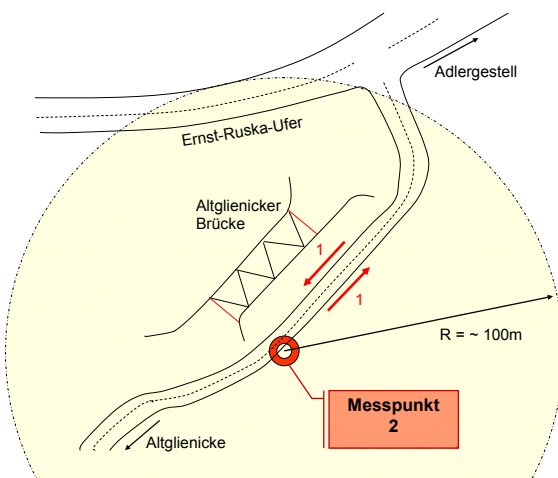


Messstandort

Nummer: 2

Lage

Köpenicker Str. (Altglienicker Brücke)
12489 Berlin



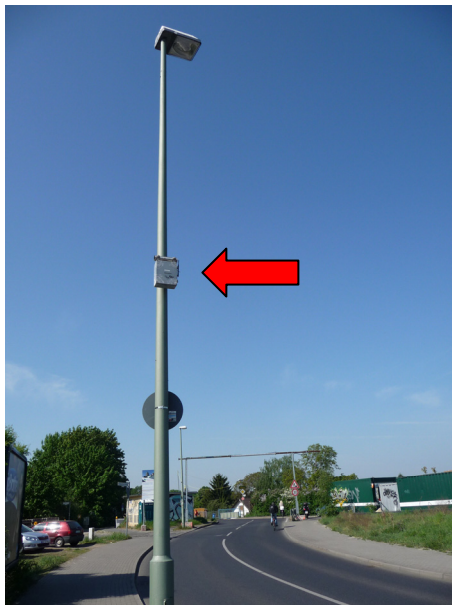
Streckencharakteristik

Fahrbahndaten:

- Anzahl Fahrstreifen je Richtung: 1
- Mittelstreifen: nicht vorhanden
- Gehweg: vorhanden
- Fahrradweg: nicht vorhanden

Abmessungen:

- Fahrstreifenbreite: jeweils 3,00m
- Gehwegbreite: pro Seite 1,50m



Laternenmast

Nummer: 22

Abstand zur Fahrbahnmitte: 3,50m

Genehmigung: **erteilt**

Bluetooth-Detektor

Nummer: 2

Sensordaten:

- Größe: ca. 20x30cm
- Gewicht: ca. 12kg
- Befestigung: Bandschelle
- Anbringungshöhe: ca. 3m
- Bluetooth-Adapter: Klasse 2
- Stromversorgung: Akku (12Ah)
- Antenne: 2,4GHz

Entfernung zum Kreuzungsbereich: ca. 100m

Details:

Vorteile:

- Laternenmast ist frei stehend (keine Beschränkungen durch Bebauung oder Bepflanzung)

Nachteile:

- Entfernung zum Ernst-Ruska-Ufer beträgt bei der kürzesten Distanz lediglich ca. 80m

Lage des Referenzsystems

Für die Referenzmessung wurden Induktivschleifendetektoren ausgewählt, die in unmittelbarer Nähe der genehmigten Bluetooth-Messstandorte gelegen sind. Auf der Grundlage der im Anhang befindlichen Messstrecken-Übersichtskarte (siehe Anlage K) wurde die folgende Abbildung 23 mit den für die Untersuchung relevanten Aspekten (Lage der genutzten Induktivschleifendetektoren) erstellt.

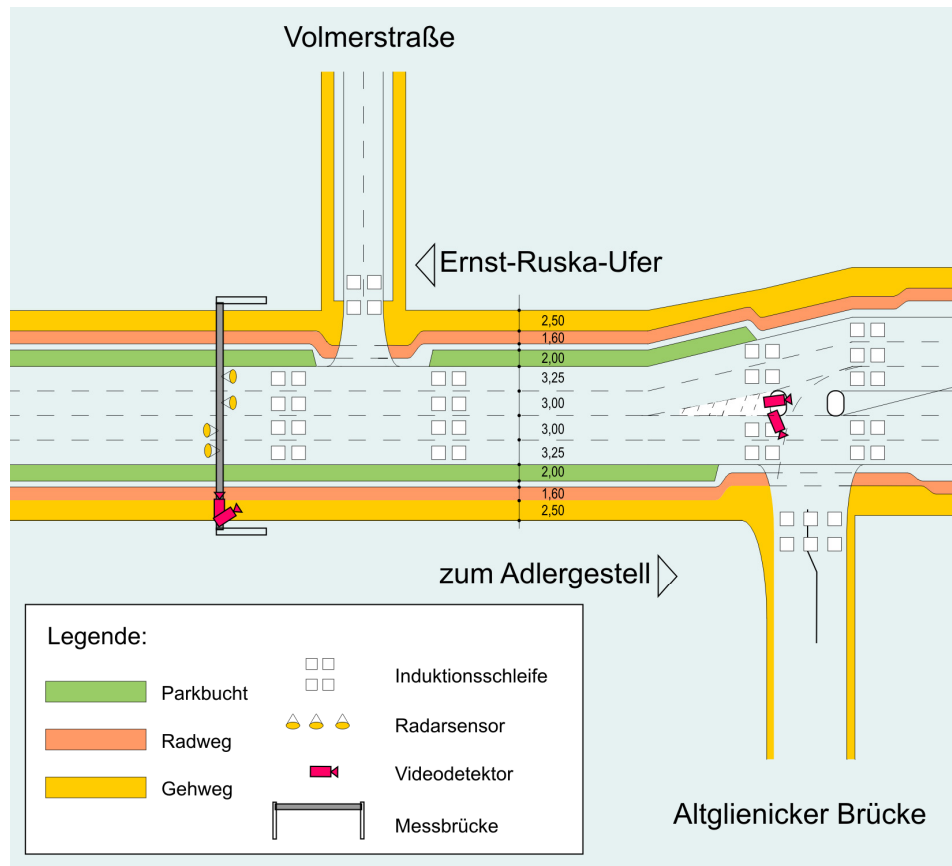


Abbildung 23: Lage des Referenzmesssystems (Induktivschleifendetektoren)

5.2.2 Vorbereitende Tests

Vor der eigentlichen Messung an den gewählten Standorten wurden darüber hinaus zunächst vorab Erhebungen auf der Messstrecke sowie auf einer Freifläche am Standort Adlershof des DLR durchgeführt. Diese Erhebungen sollten eine erste Vorstellung von der Funktionsweise und Handhabung sowie der zu erwartenden Qualität der Datenerfassung mittels Bluetooth liefern. Die Messungen auf der Freifläche erfolgten in der Regel zwischen 09:00 und 12:00 Uhr. Der Fokus lag dabei insbesondere auf der Ermittlung erreichbarer Reichweiten und geeigneter Ansprechgeschwindigkeiten vorbeifahrender Fahrzeuge. Die Messungen entstanden in diesem Fall unter Testbedingungen aufgrund der Unabhängigkeit des Messfeldes vom realen Straßenverkehr. Abbildung 24 enthält ei-

ne Übersicht des ausgewählten Messfeldes. Auf den Aufbau und die Durchführung der Messungen wird in Kapitel 6 näher eingegangen.

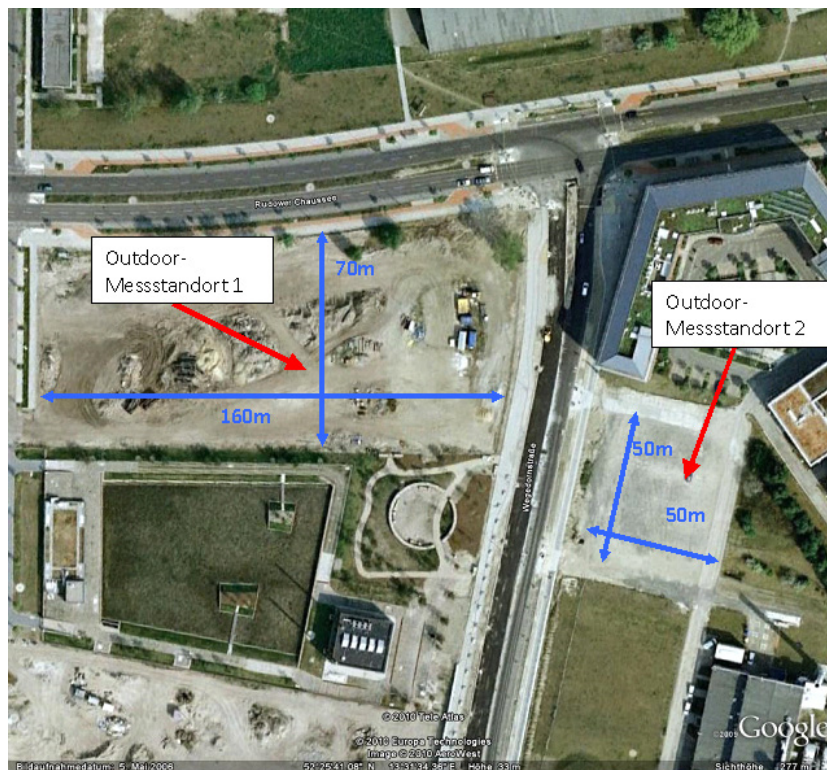


Abbildung 24: ausgewähltes Messfeld für die prototypischen Freiflächenmessungen

In einer weiteren Untersuchung auf einem Teilbereich der DLR Mess- und Versuchsstrecke „Ernst-Ruska-Ufer“, bei der Daten von 7 Tagen mit jeweils 24 Stunden pro Tag erhoben wurden, wurde dagegen die Erfassung unter realen Bedingungen vollzogen. Hierbei standen die Erfassungsraten auf gerader Strecke sowie die Wiedererkennung an einer zweiten Messstelle im Vordergrund (siehe Abbildung 25).

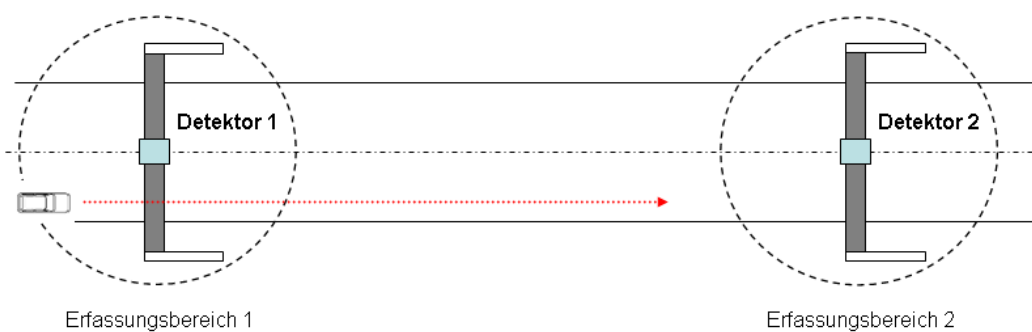


Abbildung 25: Skizze zum Versuchsaufbau für Test der Wiedererkennungsrates auf Messstrecke

Die Ergebnisse beider Testläufe werden ebenfalls in Kapitel 6 dargestellt.

5.2.3 Vorgehensweise bei der Datenerhebung

Die Untersuchungen an der ausgewählten Kreuzung wurden im März 2011 durchgeführt. Von Sonntag, dem 20.03.2011, ab ca. 18:30 Uhr bis Dienstag, dem 29.03.2011 um ca. 12:30 Uhr waren die insgesamt 5 Detektoren dauerhaft im Einsatz, wobei für die Messwertbetrachtung letztendlich nur der Zeitraum vom 21.03.2011 (Montag) bis 25.03.2011 (Freitag) relevant ist. Die Auswahl dieser Tage erfolgte, um wochentagsbedingte Schwankungen erkennen zu können. Für die Erfassung von Morgen- und Abendspitzen wurden die Daten komplett über 24 Stunden pro Tag erhoben.

Das Wetter war in der Woche der Messungen stabil und verlief ohne Niederschlag. An keinem der Untersuchungstage wurden die Messungen durch Regen beeinträchtigt. Die Temperaturen bewegten sich tagsüber im Mittel bei 13°C und nachts bei etwa 4°C. Tabelle 7 enthält die maximalen und minimalen Temperaturen pro Tag für die gesamte Messwoche.

Tabelle 7: Minimale und Maximale Temperaturen der Messwoche

Datum	Wochentag	Maximale Temperatur	Minimale Temperatur
21.03.2011	Montag	12,4°C	-0,3°C
22.03.2011	Dienstag	14,9°C	2,4°C
23.03.2011	Mittwoch	12,7°C	4,6°C
24.03.2011	Donnerstag	16,6°C	4,6°C
25.03.2011	Freitag	10,5°C	6,9°C

Parallel zur Datenerfassung mittels der Bluetooth-Detektoren erfolgte zur gleichen Zeit die Referenzmesswerterfassung an den Induktivschleifen-Detektoren. Die Induktivschleifen sind dauerhaft installiert und aktiviert und liefern daher unablässig Daten, die in einer DLR-internen Datenbank archiviert werden. Es ist zu beachten, dass diese Referenzmessungen lediglich für zwei Knotenpunktzufahrten vorliegen. Die anderen beiden Zufahrten zur der ausgewählten Kreuzung liegen nicht mehr im Bereich der DLR-Messstrecke und sind somit nicht entsprechend ausgestattet. Der Vergleich zwischen den erhobenen und den Referenzdaten zur Beurteilung der Genauigkeit der Bluetooth-Detektoren wird demnach nur für einen Teil der Kreuzung durchgeführt.

5.2.4 Vorgehensweise bei der Datenaufbereitung

Die gewonnenen Daten sind in geeigneter Form aufzubereiten. Ziel einer solchen Aufbereitung ist die Strukturierung der Datenmenge, sodass die für das Erhebungsziel relevanten Informationen extrahiert werden können.

Die Aufbereitung der Datensätze gliedert sich prozessbezogen zwischen der Datenerhebung und der Datenauswertung ein. Die Datenaufbereitung ist ein wesentliches Instrument für die Ausführbarkeit aller weiteren Aktivitäten, da die reinen (unbearbeiteten) Datensätze, die aus der Datenerhebung resultieren, zunächst eine nicht überschaubare

Anzahl an Informationen enthalten. Um schließlich nur die Informationen zu erhalten, die für die Generierung der angestrebten Ergebnisse und somit für die Beantwortung der Aufgabenstellung von Bedeutung sind, sind die im Weiteren beschriebenen Maßnahmen zur Aufbereitung erforderlich.

Abbildung 26 verdeutlicht die Einordnung der Datenaufbereitung innerhalb des Auswertungsprozesses im Sinne eines Übergangs zwischen Datenaufnahme und Datenauswertung.

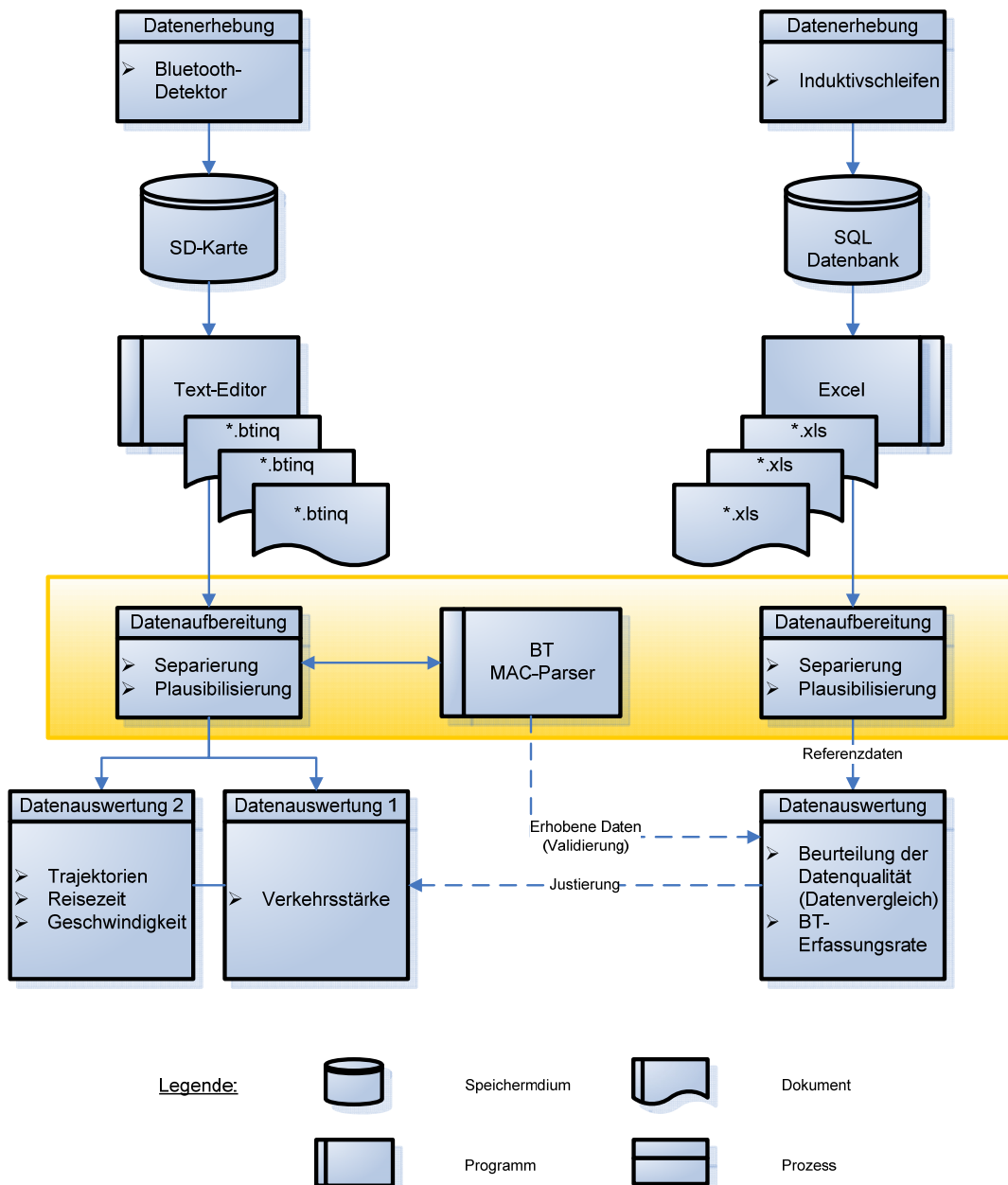


Abbildung 26: Einordnung der Datenaufbereitung in den Auswertungsprozess

Separierung der Datensätze

Da die Datensätze während der gesamten Messdauer fortlaufend gespeichert werden und somit sämtliche Daten in einer einzigen Datei archiviert sind, werden die Datensätze der verschiedenen Tage zunächst separiert und in einzelnen Dateien abgelegt.

Plausibilisierung der Datensätze

Zur Aufbereitung der Daten gehört im Weiteren die Plausibilisierung der gewonnenen Datensätze. So kann die Erfassung mittels Bluetooth-Technologie auch die mit aktivierten Bluetooth-Geräten ausgestatteten Fußgänger und Fahrradfahrer sowie stationäre Geräte, die sich beispielsweise in angrenzenden Gebäuden befinden, einschließen. Diese für die Auswertung des Verkehrsablaufs auf der Straße unerwünschten Datensätze sind zur Vermeidung von Verfälschungen der Messergebnisse zu extrahieren. Stationäre Bluetooth-Geräte können leicht gefiltert werden, da sie zumeist ständig aktiviert und somit aufgrund ihrer fehlenden Ortsveränderung über einen längeren Zeitraum dauerhaft an ein und derselben Messstelle erfassbar sind. Wird die MAC-Adresse eines Bluetooth-Gerätes somit in regelmäßigen Abständen (im Minutenbereich) über den ganzen Tag verteilt oder auch unverändert an darauf folgenden Tagen erfasst, kann davon ausgegangen werden, dass es sich um ein stationäres Gerät handelt, das nicht Bestandteil des Straßenverkehrs ist. Die Filterung von Fußgänger- bzw. Fahrradfahrerdatensätzen ist hingegen schwieriger. Wie in Kapitel 4 bereits beschrieben, ist die Unterscheidung verschiedener Verkehrsteilnehmer mittels Bluetooth äußerst komplex. Eine reine Differenzierung nach Geschwindigkeiten ist nicht in jedem Fall eindeutig. Zwar bewegen sich Fußgänger und Fahrradfahrer in den meisten Fällen langsamer als Autofahrer fort - insbesondere an Kreuzungen kann jedoch aufgrund einer unterhalb einer bestimmten Grenze liegenden Geschwindigkeit nicht automatisch der Rückschluss auf ein nicht-motorisiertes Fahrzeug erfolgen. So nähern sich gerade an Knotenpunkten die Geschwindigkeiten der verschiedenen Verkehrsteilnehmer an, wenn Abbiegevorgänge, Rückstaubildungen oder das Warten an einer Rot zeigenden LSA den Straßenverkehr verlangsamen. Bei Staubildung kann sogar der Fall eintreten, dass sich die nicht-motorisierten Verkehrsteilnehmer schneller bewegen. Eine Verfälschung der Messergebnisse kann somit sowohl in positiver als auch negativer Art und Weise erfolgen. Aufgrund dessen wurde bei der in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchung zunächst eine Kreuzung mit wenigen, unterschiedlichen Verkehrsteilnehmern gewählt. Eine zusätzliche Filterung der geringfügig vorhandenen Fußgänger- bzw. Fahrradfahrer-Datensätze ist daher nicht notwendig.

5.2.5 Konzept zur Datenauswertung

An insgesamt 5 ausgesuchten Messquerschnitten wird der Verkehrsablauf mit Hilfe der Bluetooth-Technologie über eine bestimmte Zeit beobachtet. Die erhobenen Datensätze enthalten folgende Aspekte:

- MAC-Adresse der erfassten Bluetooth-Geräte

- Zeitstempel der Erfassung
- Wert des Indikators der empfangenen Signalstärke (Received Signal Strength Indication; RSSI)

Die Auswertung der Messreihen soll darüber Auskunft geben, welche Kenngrößen erfasst werden können und wie die Qualität der erfassten Daten und damit der Erfassungstechnik selbst ist.

Aus der in Kapitel 4 vollzogenen theoretischen Analyse der Leistungsfähigkeit der Bluetooth-Detektion werden dafür exemplarisch 4 Verkehrskenngrößen ausgewählt, auf die sich die Datenauswertung im Weiteren fokussiert. Die spezifizierten Untersuchungsziele sind in Abbildung 27 zusammengefasst.

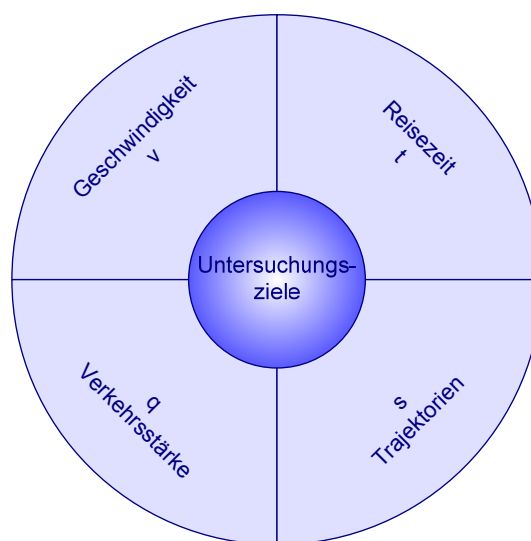


Abbildung 27: Übersicht über die Untersuchungsschwerpunkte

Im Folgenden wird der Inhalt der Datenauswertung konzeptionell beschrieben und dargestellt, wie die Generierung der gewünschten Informationen anhand der gewonnenen Datensätze erfolgt. Die Darstellung der Messergebnisse sowie deren Interpretation erfolgt schließlich in Kapitel 6.

Verkehrsstärke

Als charakteristische Informationen gelten absolute und relative Häufigkeiten. Absolute Häufigkeiten versinnbildlichen die unterschiedlichen Anzahlen von Beobachtungswerten. Relative Häufigkeiten eignen sich für Vergleichszwecke und stellen einen Anteil von Daten mit gewissen Merkmalen an der Grundgesamtheit der Beobachtungswerte dar. In Bezug auf die gewonnenen Daten stellt die Anzahl der insgesamt pro Tag erhobenen Datensätze die absolute Häufigkeit dar. Diese Anzahl kann jedoch nicht als Verkehrskenngröße gewertet werden, da die MAC-Adressen aktivierter Bluetooth-Geräte und somit im Rückschluss auch die Fahrzeuge selbst zum Teil mehrmals erfasst werden solange sie sich innerhalb des Erfassungsradius eines Bluetooth-Detektors befinden. Um die tatsächliche

Anzahl erfasster Fahrzeuge zu ermitteln, ist es demnach notwendig, die aufgenommenen MAC-Adressen unabhängig von der Anzahl ihrer Erfassung nur einmal zu werten. Die so reduzierten Datensätze stellen die relative Häufigkeit der Erfassungen dar und bilden das Verkehrsaufkommen ab. Da mittels Bluetooth-Detektion nur Fahrzeuge mit aktivierter Bluetooth-Schnittstelle erkannt werden können, spiegelt die so ermittelte Verkehrsstärke jedoch nicht das tatsächliche Gesamtverkehrsaufkommen wider, sondern wiederum nur einen gewissen prozentualen Anteil daran. Für die darauf aufbauende Bestimmung der Erfassungsrate der Bluetooth-Technologie ist die reduzierte Anzahl der erfassten MAC-Adressen der mit Hilfe der Induktivschleifen erhobenen Datenmenge, die als Referenz-Verkehrsstärke angesehen wird, gegenüber zu stellen. Aus dem so durchgeführten Vergleich resultiert der Anteil der mit Bluetooth ausgestatteten Fahrzeuge an der tatsächlichen Gesamtverkehrsstärke.

Reisezeit und Geschwindigkeit

Zur Ermittlung der Verkehrskenngrößen ‚Reisezeit‘ respektive ‚Geschwindigkeit‘ (Reise-geschwindigkeit) wird hingegen nicht die reduzierte Anzahl an Bluetooth-Geräte-Erkennungen benötigt. In diesem Fall ist gerade die Wiedererkennung zur Berechnung dieser Kenngrößen unablässig. Die Wiedererkennungen innerhalb des Erfassungsradius eines einzigen Bluetooth-Detektors spiegeln die Zeitdauer wider, die sich ein Fahrzeug innerhalb dessen befunden hat und können Auskunft über Staubildungen geben. Die Geschwindigkeit ist ebenfalls ermittelbar. Hierbei entstehen jedoch Ungenauigkeiten, da die durch das entsprechende Fahrzeug zurückgelegte Strecke innerhalb des Erfassungsradius nicht eindeutig bestimmt werden kann.

Für die Bestimmung der Geschwindigkeit wird auf die Wiedererkennung an verschiedenen Detektorstandorten zurückgegriffen. Dafür werden die erhobenen Datensätze der einzelnen Detektoren tageweise miteinander verglichen und MAC-Adressen, die an den unterschiedlichen Standorten erfasst wurden, herausgefiltert. Mit Hilfe des Zeitstempels kann daran anschließend erkannt werden, wie viel Zeit diese Fahrzeuge für die Bewältigung der Strecke zwischen den Detektorstandorten benötigt haben. Als ausschlaggebender Zeitstempel wird die erstmalige Erfassung innerhalb des Erfassungsradius gewertet. Die Kenntnis der Streckenlänge erlaubt schließlich die Berechnung der Reisegeschwindigkeit. Es ist dabei darauf zu achten, dass die resultierenden Geschwindigkeitswerte auch in diesem Fall fehlerbehaftet sind. Aufgrund der Unschärfe der tatsächlichen Fahrzeugposition bei erstmaliger Erfassung liegt ein systematischer Fehler vor.

Fahrzeugtrajektorien

Neben der Ermittlung von Reisezeit und Geschwindigkeit aus der Wiedererkennung an verschiedenen Detektorstandorten können anhand dieser Informationen auch Fahrzeugtrajektorien erstellt werden. Mit dem Wissen, wann welche MAC-Adresse an welchem Detektor erkannt wurde, wird daher das Bewegungsprofil des entsprechenden

Fahrzeugs rekonstruiert. Aufbauend auf dem Ergebnis dieser Rekonstruktion wird die Verteilung der Verkehrsströme in einer O-D-Matrix abgebildet.

5.3 Fazit

In Kapitel 5 wurde zunächst der Untersuchungsgegenstand, d.h. das Ziel der zur Überprüfung der theoretischen Erkenntnisse aus Kapitel 4 angedachten empirischen Analyse, hergeleitet. Hierbei wurde der Fokus auf die Untersuchung der Anwendbarkeit der Bluetooth-Detektion im Rahmen eines Versuchsaufbaus an einer innerstädtischen Kreuzung gelegt. Im Weiteren wurde die Herangehensweise an die empirische Untersuchung erläutert. Mit der Darstellung aller zu vollziehender Untersuchungsschritte wurde ein strukturelles Grundgerüst für den Aufbau der Untersuchung gegeben. Die zu den einzelnen Schritten gehörenden Aufgaben wurden eingehend erläutert und bereits in Bezug zum im Rahmen dieser Arbeit gewählten Messaufbau gesetzt. Mit dem Konzept zur Datenauswertung wurden bereits die angestrebten Untersuchungsschwerpunkte festgelegt und deren Erreichbarkeit erläutert.

Das Ziel der im Weiteren folgenden empirischen Untersuchung besteht nun darin, die in Kapitel 4 zunächst theoretisch analysierten Fähigkeiten der Bluetooth-Detektoren bezogen auf ein praxisrelevantes Umfeld zu überprüfen. Es sollen dabei vor allem die Erfassbarkeit spezieller verkehrstechnischer Kenngrößen sowie das Ausmaß des praktischen Nutzwertes dieser neuen Detektionsart im Fokus der Betrachtungen stehen.

Da die vorliegende Arbeit weder das am DLR durchgeführte Forschungsprojekt wiedergeben soll noch kann, erfolgt eine Eingrenzung auf wenige, jedoch für das Verkehrsmanagement relevante Aspekte, wie die Untersuchung der Messbarkeit von Verkehrsströmen (Erfassungsraten, Quelle-Ziel-Betrachtungen) oder auch der Berechenbarkeit von Reisezeiten und Geschwindigkeiten.

Als Zusammenfassung dieses Kapitels wurde eine Check-Liste erstellt, anhand derer die für die empirische Untersuchung relevanten Schritte nachvollzogen werden können. Diese Check-Liste kann für andere empirische Untersuchungen unabhängig vom Untersuchungsziel gleichermaßen Anwendung finden (siehe Anlage J).

6 Empirische Untersuchung

Im folgenden Kapitel werden die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten empirischen Untersuchungen beschrieben und deren Ergebnisse dargestellt sowie interpretiert. Das Kapitel gliedert sich dabei in zwei Teile.

Im ersten Teil werden die im Vorfeld der eigentlichen Hauptuntersuchung durchgeführten Tests vorgestellt. Um die Eigenschaften und Eigenheiten der Bluetooth-Technologie, speziell des am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt entwickelten Bluetooth-Detektors, kennenzulernen, wurde dessen Funktionsweise innerhalb der prototypischen Tests anhand verschiedener Versuchsszenarien zunächst vorab untersucht. Es werden der Messaufbau und die Durchführung sowie die Ergebnisse und die sich daraus ergebenden Erkenntnisse erläutert.

Im Zweiten Teil erfolgt dann die Darstellung der eigentlichen empirischen Hauptuntersuchung. Das für diese Zwecke ausgewählte Messfeld wird nochmals kurz dargelegt. Ferner folgen Erläuterungen zur Realisierung der Datenerhebung, -aufbereitung und -auswertung. Die Ergebnisse werden anschließend getrennt nach Analyseschwerpunkten vorgestellt und interpretiert. Der Fokus liegt hierbei auf der Untersuchung spezieller verkehrstechnischer Kenngrößen.

Eine abschließende Diskussion potentieller Fehlerquellen rundet das Kapitel ab. Im Fazit werden die relevanten Erkenntnisse der empirischen Untersuchung dann nochmals zusammengefasst.

6.1 Prototypische Tests zur Untersuchung genereller Eigenschaften

Im Vorfeld der eigentlichen empirischen Untersuchung erfolgte eine eingehende Prüfung der zur Anwendung kommenden Technik, um vorab einen Eindruck von der Funktionsweise und den Charakteristiken der Bluetooth-Technologie im Rahmen der Verkehrserfassung zu erhalten.

Hierfür wurden einerseits auf einer Freifläche und einem Parkplatz in Berlin-Adlershof in unmittelbarer Nähe des Standortes des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt Berlin Messungen zur Ermittlung maximaler Reichweiten und Erkennungszeiten sowie geeigneter Ansprechgeschwindigkeiten durchgeführt.

Desweiteren erfolgten Untersuchungen auf der ebenfalls am Standort Adlershof befindlichen Messstrecke des DLR, die aus einem mit verschiedenen Erfassungssystemen ausgestatteten Teilstück einer durch den regulären Verkehr genutzten Straße (Ernst-Ruska-Ufer) besteht und daher erste Erkenntnisse zur Nutzung der Funktechnik im realen Umfeld bieten sollte. In diesen Messungen lag der Fokus auf der Bestimmung der mittels Bluetooth erreichbaren Erfassungsraten sowie der Anzahl an Wiedererkennungen, die mit Bluetooth detektiert werden können.

6.1.1 Messaufbau

Messstrecken-Test

Der Messstrecken-Test fand auf dem vom DLR als Teststrecke genutzten Teilstück des Ernst-Ruska-Ufers in Berlin statt. Das Ernst-Ruska-Ufer begrenzt den Wissenschaftsstandort Berlin-Adlershof in südlicher Richtung und stellt eine Verbindungsstrecke zwischen den im Südosten der Stadt liegenden Bezirken und der Stadtautobahn dar. Die Messstrecke ist mit verschiedenen Detektionssystemen ausgestattet, die es ermöglichen, Verkehrserfassungsmethoden im realen Umfeld zu testen.

Für den Messstrecken-Test der Bluetooth-Detektoren wurden jeweils drei Bluetooth-Adapter der Klasse 2 parallel mittels USB-Verlängerung an zwei Outdoor-Laptops mit Linux-Betriebssystem angeschlossen. Die Laptops wiederum wurden auf den beiden zum DLR gehörenden sog. Messbrücken, von denen eine am östlichen Ende und die andere am westlichen Ende der Messstrecke aufgebaut ist, installiert (siehe dazu Abbildung 25 in Abschnitt 5.2.2) Die Messbrücken sind ca. 820m voneinander entfernt und dienen als Überkopfhaltung für Kamera- und Radar-Detektionssysteme. Je Messbrücke erfolgte die Anbringung eines Laptops. Die Nutzung der DLR-Messstrecke gestattete zudem eine parallel zu den Testmessungen stattfindende Erhebung mittels Induktivschleifendetektoren, die eine Referenzierung der Daten ermöglichte. Die Messungen auf der Messstrecke erfolgten ganztägig von 0 bis 24 Uhr im Zeitraum vom 12.07.2010 bis 18.07.2010. Das Messfeld kann in Anlage K eingesehen werden.

Freiflächen-Test

Das für die Freiflächen-Tests genutzte Messfeld in unmittelbarer Nähe des DLR Standortes Berlin ist ein durch die beiden Straßen Wegedornstraße und Rudower Chaussee begrenztes, unbebautes Gelände, das sich aufgrund seiner Ausdehnung und der Unabhängigkeit vom regulären Verkehrsgeschehen für prototypische Testmessungen eignet. Als weiteres Testfeld zur Untersuchung der Auswirkung metallischer Fahrzeugmassen wurde der DLR-eigene Parkplatz genutzt. Das in diesem Fall gewählte Messfeld wurde bereits Abbildung 24 in Abschnitt 5.2.2 skizziert.

Für die Untersuchungen der Eigenschaften der Bluetooth-Technik beim Verbindungsaufbau hinsichtlich erreichbarer Reichweiten sowie der Dauer des Inquiry-Vorgangs wurden die Bluetooth-Adapter, die über USB-Verlängerungen an einen Laptop angeschlossen wurden, jeweils auf der Spitze eines Pylonen befestigt, sodass sie in einer Höhe von 50cm und einem Abstand von etwa 30cm nebeneinander platziert waren. Für die Messungen wurden Bluetooth-Adapter mit den Reichweiten-Klassen 1 und 2 untersucht. Die Messungen erfolgten zunächst mit einem Adapter, anschließend mit zwei bzw. drei parallel angeschlossenen Bluetooth-Adaptoren. Als zu detektierende Bluetooth-Geräte kamen drei Mobiltelefone mit Bluetooth-Schnittstellen der Klasse 2 zum Einsatz. Bei der Untersuchung möglicher Auswirkungen metallischer Massen auf dem DLR-Parkplatz wurden die Mobiltelefone stattdessen jeweils in ein Auto gelegt (Ablagefläche über dem

Handschuhfach). Die Messungen fanden vom 11.10.2010 bis 13.10.2010 jeweils in der Zeit von 9 bis 12 Uhr statt.

Daneben erfolgten auch Untersuchungen der Zusammenhänge zwischen gefahrenen Geschwindigkeiten und der Anzahl der Erkennungen. Für die Bestimmung dieser Ansprechgeschwindigkeiten wurde wiederum die Freifläche am DLR Standort Adlershof genutzt – in diesem Fall speziell die Verbindungsstraße zwischen Wededorn- und North-Willys-Straße, die parallel zur Rudower Chaussee verläuft und eine nicht regulär befahrene Nebenstraße mit einer Länge von etwa 280 Metern darstellt. In diesem Fall wurden als detektierende Geräte nur Bluetooth-Adapter der Klasse 1 verwendet. Auch hier erfolgten die Messungen zunächst mit einem, dann mit zwei und später drei parallel platzierten Adaptern. Für die Geschwindigkeitsmessungen wurden die detektierenden Bluetooth-Geräte etwa in der Mitte der betrachteten Strecke ebenfalls auf jeweils einem Pylon installiert. Ein Handy mit Bluetooth-Schnittstelle der Klasse 2 innerhalb des fahrenden Fahrzeugs diente als zu erkennendes Gerät. Die Geschwindigkeitsmessung fand am 14.10.2010 zwischen 9 und 11 Uhr statt.

6.1.2 Ergebnisse

Ergebnisse des Messstrecken-Tests

Ziel dieser ersten Messungen war es, einen Eindruck von der Fahrzeugerkennung und –wiedererkennung mittels Bluetooth-Detektoren zu erhalten. Um die erzielten Ergebnisse im Kontext des Gesamtverkehrsaufkommens bewerten zu können, wurde das Verkehrsaufkommen zu Referenzierungszwecken parallel durch Induktivschleifendetektoren aufgenommen. Die Ergebnisse beider Messungen liegen in Tabelle 8 vor und geben einen Überblick über den Anteil der mit Bluetooth-Adaptern der Klasse 2 erfassten Fahrzeuge. Bei den dargestellten Werten handelt es sich um die Summe aller Erfassungen während der gesamten Messzeit von einer Woche.

Tabelle 8: Ergebnisse der Messstrecken-Tests

Messgrößen	Brücke West	Brücke Ost
Anzahl Fahrzeuge (Querschnitt Schleifen)	130071	138330
Anzahl BT-Datensätze (alle Detektionen)	24409	31841
Anzahl MAC-Adressen (ohne Dopplungen)	8938	8938
Anzahl Wiedererkennungen (≤ 100s)	4736 (3,4% vom Ostquerschnitt)	

Wie der Tabelle 8 zu entnehmen ist, passierten über die gesamte Woche hinweg im Mittel ca. 134.000 Fahrzeuge die betrachteten Induktivschleifendetektoren. Im Vergleich dazu zeichneten die Bluetooth-Detektoren im Mittel nur etwa 28.000 Datensätze auf. Diese Zahl entspricht jedoch nicht der wahren Anzahl erfasster Fahrzeuge. Fahrzeuge mit Bluetooth-fähigen Geräten können, solange sie sich innerhalb des Erfassungsradius befinden,

auch mehrmals detektiert werden. Es ist daher notwendig, die Anzahl der Detektionen nochmals zu reduzieren, indem die Datensätze nach den erfassten MAC-Adressen gefiltert werden, sodass letztendlich jede vorkommende MAC-Adresse nur einmal gewertet wird. Dieses Vorgehen ermöglicht die Ermittlung der Anzahl tatsächlich erfasster Fahrzeuge. Somit wurden effektiv 8938 Bluetooth-Geräte, d.h. Datensätze ohne Dopplungen der erfassten MAC-Adressen, an jedem Messquerschnitt erkannt. Bei der Betrachtung der Wiedererkennungen, d.h. der MAC-Adressen, die sowohl an der einen als auch der anderen Messbrücke detektiert wurden, zeigte sich, dass lediglich gut die Hälfte der mittels Bluetooth erfassten Fahrzeuge auch ein zweites Mal erkannt, also wiedererkannt wurde. Für die Wiedererkennung wurde eine maximale Zeitdifferenz von 100 Sekunden festgelegt. Diese Festlegung beruht auf der Annahme, dass für die Überbrückung der 820 Meter langen Strecke zwischen den Messbrücken bei einer Mindestgeschwindigkeit von 30 km/h etwa 100 Sekunden Fahrzeit benötigt werden würden. Im Normalfall wird die pro Richtung 2-spurig ausgebaute Straße an dieser Stelle mit Geschwindigkeiten zwischen 50 km/h und 70 km/h befahren, was einer Fahrzeit zwischen 60 Sekunden und 40 Sekunden entspricht. Von Fahrzeugen, die für die Überbrückung der Distanz demnach länger als 100 Sekunden brauchten, kann mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit angenommen werden, dass sie entweder einen Zwischenhalt eingelegt haben (z.B. bei Nutzung der Parkbuchten, für Einkäufe oder sonstige Besorgungen) oder aber eine der abzweigenden Nebenstraßen als Ausfahrt genutzt haben, um eine gewisse Zeit später über eben diese Nebenstraßen wieder zurück auf die Messstrecke zu gelangen, wie es z.B. der Fall ist bei Berufspendlern, die am Wissenschaftsstandort Adlershof arbeiten. Unter der aufgrund dessen festgelegten Bedingung, dass die Zeit zwischen der Wiedererkennung maximal 100 Sekunden betragen durfte, wurden 4736 Fahrzeuge demnach wiedererkannt. Bezogen auf die mittels der Induktivschleifendetektoren am Ostquerschnitt erfasste Verkehrsmenge entspricht dies einem Prozentsatz von 3,4%. Das bedeutet, dass lediglich etwa 3% der Fahrzeuge des Gesamtverkehrsaufkommens auch tatsächlich durch die Bluetooth-Detektoren an zwei Messstandorten wiedererkannt wurden. Aus Abbildung 28 ist die Verteilung der Anzahl der Wiedererkennungen über den Tag, aggregiert auf 1-Stunden-Intervalle, zu entnehmen.

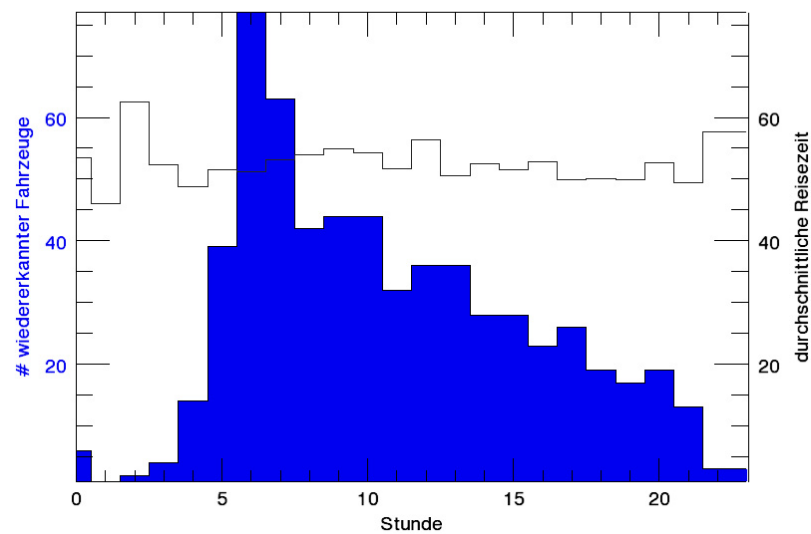


Abbildung 28: Anzahl der Matches und daraus ermittelte Reisezeit am 12.7.2010, stadteinwärts, 1 Stunde

Es ist ersichtlich, dass die Verteilung der Wiedererkennungen entsprechend dem Verkehrsaufkommen variiert. Je mehr Fahrzeuge die Strecke befahren, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit der Erfassung eines mit einem aktivierten Bluetooth-fähigen Gerät ausgestatteten Fahrzeuges und umso höher ist gleichzeitig die Wahrscheinlichkeit einer Wiedererkennung. Die im Diagramm erkennbare morgendliche Spitze der Wiedererkennungen für die stadteinwärts führende Richtung könnte sich aus der Tatsache ergeben, dass diese Richtung insbesondere von Berufspendlern auf dem Weg von den im Südosten liegenden Wohngebieten zu den stadteinwärts gelegenen Arbeitsstätten genutzt wird.

Aus der Wiedererkennung einer MAC-Adresse und der bekannten Länge der zwischen den Erkennungen zurückgelegten Strecke kann wiederum die Reisezeit des erfassten Fahrzeuges berechnet werden. Auf Basis dessen wurde entsprechend der auf 1-Stunden-Intervalle aggregierten Wiedererkennungsmengen auch die durchschnittliche Reisezeit für jedes 1-Stunden-Intervall bestimmt und ebenfalls im Diagramm abgetragen. Die bereits zuvor erwähnte typische Geschwindigkeit zwischen 50 km/h und 70 km/h konnte mit diesen Messungen demnach bestätigt werden.

Die Ergebnisse zeigen zusammengefasst deutlich, dass mit Hilfe der Bluetooth-Detektoren wesentlich weniger Fahrzeuge des Gesamtverkehrsaufkommens im Vergleich zu gängigen Detektionssystemen, wie in diesem Fall Induktivschleifendetektoren, erfasst werden. Dies liegt zum Einen daran, dass technikbedingt nur Fahrzeuge mit Geräten, die eine aktivierte Bluetooth-Schnittstelle besitzen, überhaupt detektiert werden können. Zum Anderen wurden Bluetooth-Adapter mit einer geringeren Reichweite (Klasse 2 mit Reichweite bis 25 Meter) verwendet, denen aufgrund ihres eingeschränkten Erfassungsradius weniger Zeit zur Detektion anderer Bluetooth-Geräte zur Verfügung steht. Die er-

mittelte Wiedererkennungsrates von ca. 3 % ist darüber hinaus im Vergleich zu in der Literatur verfügbaren Angaben von 20 % bis 40 % relativ gering. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass bei diesen Messungen kein beschleunigter Inquiry-Vorgang implementiert wurde, der es beispielsweise ermöglichen würde, das abgetastete Frequenzband in zwei Hälften zu teilen, deren Frequenzen dann wiederum parallel durchgegangen werden könnten. Die Zeit zwischen der erneuten Abtastung einer bestimmten Frequenz würde sich somit verringern und damit auch die Wahrscheinlichkeit einer Erkennung erhöhen. Es kann zudem konstatiert werden, dass die Berechnung der Reisezeit auf Basis der Wiedererkennung von Bluetooth-Geräten realistische Ergebnisse liefert, die dem Vergleich mit den durch das Referenzsystem (Induktivschleifendetektoren) erfassten Reisezeiten standhalten können. An dieser Stelle sei jedoch auch hier auf den bereits in Kapitel 4 erläuterten Ortsfehler, der eine gewisse Unschärfe hervorruft, hingewiesen. Die entstehende Verzerrung zwischen den so berechneten und den Referenz-Reisezeiten fällt in diesem Fall jedoch aufgrund des verringerten Erfassungsradius der verwendeten Klasse-2-Bluetooth-Adapter geringer aus.

Ergebnisse des Freiflächen-Tests

Reichweiten und Inquiry-Zeiten

Zur Bestimmung der maximalen Reichweiten und der für diese Entfernungen benötigten Inquiry-Zeiten bewegte sich ein Proband mit dem zu erkennenden Gerät (Mobiltelefon) in der Hand vom Detektor weg. In regelmäßigen Abständen wurde dann überprüft, ob der Detektor das entsprechende Gerät noch erkennt. Auf Basis dessen konnte so die maximale Detektionsreichweite ermittelt werden. Diese Tests wurden in adäquater Art und Weise sowohl mit einer Variation der Anzahl der detektierenden Bluetooth-Adapter (1, 2 und 3 Adapter) als auch mit unterschiedlich vielen Mobiltelefonen (1 und 3 Handys) durchgeführt.

Um eine Erkennung in jedem Fall sicherzustellen, wurde in einem zweiten Schritt aus allen drei Szenarien (1, 2 und 3 Detektoren) die geringste, maximale Reichweite (hier 64 Meter) gewählt. Anschließend wurden wiederum für alle Szenarien inklusive Variation der Anzahl der zu erkennenden Mobiltelefone, die Inquiry-Zeiten, die der Detektor für die Erkennung der Geräte an dieser Position benötigte, gemessen. Zur besseren Einschätzung der so bestimmten Inquiry-Zeiten wurde darüber hinaus eine Referenzmessung für den Abstand von 1 Meter durchgeführt. Alle Messungen wurden viermal wiederholt. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Tabelle 9 dargestellt – es handelt sich hierbei bereits um die auf den jeweiligen Messwerten basierenden arithmetischen Mittelwerte. Um die Streuung der Messwerte zu verdeutlichen, wurde zusätzlich die durchschnittliche Abweichung d bestimmt. Dieses Maß der Streuung innerhalb der Messwerte gibt die durchschnittliche absolute Abweichung der einzelnen Messwerte von ihrem Mittelwert (hier arithmetischer Mittelwert entsprechend Formel 8) an:

$$d = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|$$

Formel 8

In Tabelle 9 wird die durchschnittliche Abweichung anhand der sich an die Mittelwerte anschließenden Angaben ($\bar{x} \pm d$) wiedergegeben.

Tabelle 9: Ergebnisse der Freiflächen- und Parkplatzmessungen

Ergebnisse der Freiflächenmessung (Detektor = Kl. 1, Handy = Kl. 2)				
Anzahl der Handys	Inquiryzeit [s]	Anzahl der Detektorgeräte		
		1	2	3
1	in 1m Entfernung	8,6 ± 4,7	7,9 ± 3,0	5,5 ± 2,3
	in 64m Entfernung	14,1 ± 6,3	16,6 ± 14,3	31,8 ± 23,3
3	in 1m Entfernung	13,9 ± 5,6	8,6 ± 2,1	11,2 ± 3,0
	in 64m Entfernung	26,9 ± 13,9	16,0 ± 8,3	51,0 ± 32,2
maximale Reichweite [m]		89,7 ± 1,8	85,0 ± 9,3	83,7 ± 20,9

Ergebnisse der Parkplatzmessung (Detektor = Kl. 1, Handy = Kl. 2)				
Anzahl der Handys	Inquiryzeit [s]	Anzahl der Detektorgeräte		
		1	2	3
1	in 1m Entfernung	13,3 ± 2,4	7,1 ± 4,1	6,3 ± 3,8
	in 64m Entfernung	18,4 ± 7,1	19,5 ± 7,3	24,8 ± 10,1
maximale Reichweite [m]		32,3 ± 7,8	30,8 ± 4,3	29,0 ± 5,0
3	in 1m Entfernung	13,3 ± 2,4	7,1 ± 4,1	6,3 ± 3,8
	in 64m Entfernung	15,3 ± 5,6	10,8 ± 5,5	16,1 ± 9,8
maximale Reichweite [m]		14,3 ± 2,4		

Die gesamte Messung wurde einmal mit Bluetooth-Adaptoren der Klasse 1 als Detektoren sowie ein zweites Mal mit Bluetooth-Adaptoren der Klasse 2 vollzogen. Die Ergebnisse der Messung mit Bluetooth-Adaptoren der Klasse 2 können in der Tabelle in Anlage L eingesehen werden.

Zu Beginn der Messungen wurde erwartet, dass eine erhöhte Anzahl an Bluetooth-Detektor-Geräten aufgrund einer besseren Abdeckung durch gleichzeitige Abtastung verschiedener Frequenzen die Erkennung begünstigt und die Zeiten bis zur Detektion verkürzt. Diese Vermutung konnte zumindest bei der Erfassung der sich im Abstand von 1 Meter befindlichen Bluetooth-Geräte bestätigt werden, bei denen die benötigten Inquiry-Zeiten im Mittel mit steigender Anzahl an Detektoren abnehmen. Dies traf sowohl auf die Verwendung von Bluetooth-Adaptoren der Klasse 1 als auch Adaptoren der Klasse 2 sowie bezogen auf die verschiedenen Szenarien (Freifläche und Parkplatz) zu. Gegen diese Annahme sprechen hingegen die ermittelten Inquiry-Zeiten für eine Entfernung von 64 Metern. Bei Nutzung von Detektoren der Klasse 1 nahmen die Zeiten entgegen der Vermutung mit steigender Anzahl an Detektoren zum Teil stark zu. Dieser Effekt trat jedoch nur im Fall der Nutzung von Klasse 1 Adaptoren als Detektoren auf – bei der Verwendung von Klasse 2 Adaptoren sank entsprechend der Annahme die benötigte Zeit zur Erkennung auch für eine Entfernung von 64 Metern je mehr Detektoren zum Einsatz kamen.

Aufgrund der sich widersprechenden Ergebnisse liegt die Vermutung nahe, dass sich zeitgleiche Inquiry-Vorgänge der Bluetooth-Adapter mit Klasse-1-Schnittstelle insbesondere dann, wenn der Abstand zwischen den detektierenden Geräten gering ist, gegenseitig beeinflussen. Grund hierfür könnte die höhere Signalstärke sein, mit der Bluetooth-Schnittstellen der Klasse 1 senden und die es ihnen erlaubt höhere Reichweiten zu erbringen als Adapter mit Bluetooth-Schnittstelle der Klasse 2 oder gar Klasse 3. Die in diesem Fall zu geringe Datenbasis erlaubt jedoch diesbezüglich keine quantifizierbaren Rückschlüsse.

Desweiteren wurde im Vorfeld der Messungen angenommen, dass die Zeiten, die zur Erkennung von Bluetooth-Geräten benötigt werden, mit steigender Entfernung zunehmen. Dies konnte für alle Messungen bestätigt werden. Unabhängig von der Anzahl der zur Verfügung stehenden Detektoren und der Menge detektierbarer Bluetooth-Geräte konnte vergleichend zur Erfassungszeit bei einer Entfernung von 1 Meter eine deutliche Erhöhung der benötigten Inquiry-Zeiten für den Abstand von 64 Metern festgestellt werden.

Weiterhin kann anhand der Ergebnisse konstatiert werden, dass die maximale Reichweite mit steigender Anzahl an Detektor-Geräten abnimmt. Der Grund für diese Abnahme wird auch in diesem Fall auf Effekte gegenseitiger Störung zurückgeführt. Die Reichweiten streuen zum Teil stark und lassen kein eindeutiges Muster hinsichtlich der Ursachen erhöhter oder niedriger Streuung erkennen. So erscheint beispielsweise bei der Freiflächenmessung und der Konstellation eines Klasse-1-Bluetooth-Adapters als Detektor und einem Mobiltelefon mit Bluetooth-Schnittstelle der Klasse 2 die Streuung der erreichten Entfernungen umso stärker, je mehr Detektoren genutzt werden. Vergleicht man diese Feststellung jedoch mit den Ergebnissen der zweiten Messung, bei der eine Konstellation aus Bluetooth-Klasse-2-Adapter als Detektor und wiederum einem Mobiltelefon mit Bluetooth-Schnittstelle der Klasse 2 vorlag, so stellt sich in diesem Fall ein gegenläufiges Resultat ein. Obwohl auch hier die erreichbaren Entfernungen mit steigender Anzahl an Detektoren abnehmen, scheint die Streuung jedoch umso geringer zu werden je mehr Inquiry-Geräte zur Verfügung stehen. Auch die Parkplatzmessungen lassen in diesem Fall keine weiteren Rückschlüsse zu.

Abschließend kann festgestellt werden, dass die maximal erzielbaren Reichweiten für die Freiflächenmessungen im Mittel bei etwa 85 Metern, für die Parkplatzmessungen dagegen etwas niedriger bei ca. 26 Metern lagen. Die Ursache für die Abnahme der Reichweiten bei der Parkplatzmessung liegt höchstwahrscheinlich darin begründet, dass sich die zu detektierenden Geräte innerhalb der Fahrzeuge befunden haben und somit durch die sie umgebende metallische Masse abgeschirmt wurden.

Insgesamt ist festzuhalten, dass die Freiflächen- und Parkplatzmessungen keine repräsentative Datenbasis aufgrund der geringen Anzahl an Versuchen darstellen. Die teils widersprüchlichen Ergebnisse verdeutlichen dies und geben Grund zu der Annahme, dass bisher noch nicht ausreichend untersuchte Störeffekte einen erheblichen Einfluss auf die

Wirkungsweise dieser neuen Detektionstechnologie besitzen. Als Störeffekte kommen beispielsweise Effekte gegenseitiger Störung durch zeitgleiche Inquiry-Vorgänge oder auch externe Ursachen wie z.B. Witterung oder die umgebende Infrastruktur in Frage. Diese Effekte konnten zwar innerhalb der Messungen nicht messtechnisch quantifiziert werden, fielen jedoch den Probanden auf. So veränderten sich beispielsweise die Witterungsbedingungen an einem der Messtage während der Messungen von stark neblig zu sonnig. Laut den Probanden hatte dies scheinbar Auswirkungen auf die erzielbaren Reichweiten und die zur Erfassung benötigten Zeiten. So fielen die Reichweiten bei Nebel offensichtlich kürzer aus als bei Sonnenschein. Auch die Inquiry-Zeiten verlängerten sich. Ursache hierfür könnte der Dämpfungsfaktor von Wasser sein – mit zunehmender Luftfeuchtigkeit würde sich demnach die Dämpfung erhöhen und so die erreichbaren Entfernungen verkürzen.

Ansprechgeschwindigkeiten

In Vorbereitung der Messungen zur Untersuchung der Ansprechgeschwindigkeiten wurden wiederum zunächst die Erfassungsreichweiten des genutzten Inquiry-Gerätes ermittelt. Um einen Eindruck davon zu erhalten, wie sich die Lage des Handys im Fahrzeug auf die Reichweite auswirkt, wurde diese Messung zweifach durchgeführt: einerseits außerhalb des Fahrzeugs, andererseits innerhalb dessen. Dafür wurde der Detektor (PC mit Bluetooth-Adapter Klasse 1) mittig am Straßenrand der Messstrecke platziert. Für die Reichweitenmessung ohne Fahrzeug lief ein Proband, das Handy offen in der Hand vor sich tragend, zunächst in die eine Richtung der Straße vom Detektor weg bis zu der Stelle an der die Erfassung gerade noch gewährleistet war - das Gleiche wurde für die andere Straßenrichtung wiederholt. Die Reichweitenmessung im Fahrzeug wurde äquivalent ausgeführt – das Handy lag hier jedoch auf der Ablage über dem Handschuhfach. Die gemessenen Reichweiten wurden mit Pylonen markiert, wie in Abbildung 29 dargestellt. Entgegen der Erwartungen entsprachen die Reichweiten in beiden Fällen einander und betrug jeweils etwa 90 Meter.

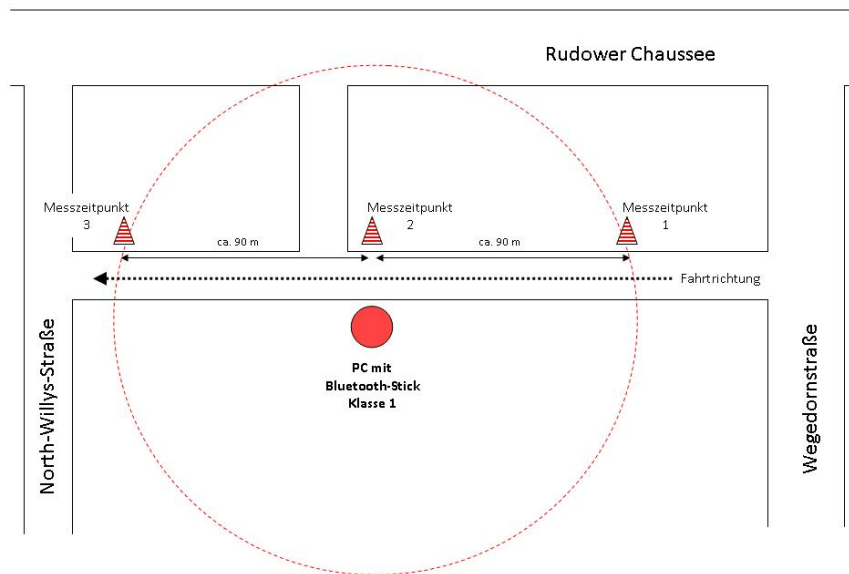


Abbildung 29: Messaufbau zur Untersuchung der Ansprechgeschwindigkeiten

Anschließend erfolgten die Messfahrten, für die ein Proband an den Anfang der Straße fuhr und von dort bis zum ersten Pylon auf die geforderte Geschwindigkeit beschleunigte. Bei Erreichen des ersten Pylonen wurde die Zeit notiert, zu der das Fahrzeug am Pylon vorbeifuhr und entsprechend in den Erfassungsradius des Bluetooth-Detektors einfuhr (= Zeitpunkt 1). Das Gleiche wurde äquivalent bei Erreichen des in der Mitte befindlichen Messaufbaus mit dem Bluetooth-Detektor (= Zeitpunkt 2 bei Pylon 2) sowie am Ende des Erfassungsradius bei Pylon 3 (= Zeitpunkt 3) vorgenommen. Ab dem Zeitpunkt des Eintritts in den Erfassungsradius (bei Pylon 1) wurde versucht, möglichst konstant die entsprechende Geschwindigkeit bis zum Ende des Erfassungsradius einzuhalten.

Es wurden insgesamt Messfahrten mit vier verschiedenen Geschwindigkeiten (30 km/h, 40 km/h, 50 km/h und 60 km/h) durchgeführt. Für jede Geschwindigkeit erfolgten 3 Messungen. Darüber hinaus wurden Variationen in der Anzahl der genutzten Bluetooth Adapter der Klasse 1 als Detektor vorgenommen. Zuerst wurde die Messung mit einem Bluetooth-Adapter der Klasse 1 durchgeführt, danach mit zweien und zuletzt mit drei Adaptern. Somit ergaben sich bei drei Variationen der genutzten Bluetooth-Adapter mit jeweils vier verschiedenen Geschwindigkeiten à drei Durchläufen insgesamt 36 Messungen.

Aus den bekannten Zeitpunkten der Ein- und Ausfahrt aus dem Erfassungsbereich und den automatisch gespeicherten Erkennungszeiten des Handys konnte so die Anzahl der Erfassungen innerhalb dieses Bereiches abgeleitet werden, um Aussagen darüber treffen zu können, wie oft das Fahrzeug bei der Fahrt mit jeweils unterschiedlichen Geschwindigkeiten erkannt wurde und ob es öfter vor oder hinter dem Bluetooth-Detektor erfasst wurde.

Anhand Tabelle 10 zeigt sich, dass die Anzahl der Erfassungen insgesamt abnimmt, je mehr Bluetooth-Adapter der Klasse 1 für den Empfang verwendet werden – wird das gesuchte Gerät mit einem einzigen verwendeten Adapter der Klasse 1 noch 14mal erkannt, sind es bei Nutzung von 3 Adaptern nur noch 7 Erfassungen. Grund dafür könnte die gegenseitige Beeinflussung der Adapter sein. Der Anschluss der Bluetooth-Adapter erfolgte am Rechner über einen passiven USB-Hub – eine Verlängerung über zusätzliche USB-Kabel erlaubte die Anbringung der BT-Sticks an einem Pylon. Der Anbringungsabstand zwischen den Adaptern am Pylon betrug jedoch lediglich ca. 30 cm!

Tabelle 10: Anzahl der Erfassungen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten und für verschiedene Anzahlen von Inquiry-Geräten

Geschwindigkeiten laut Tacho	Erfassungen Abschnitt 1	Erfassungen Abschnitt 2	Erfassungen insgesamt
Messfahrt 1 (Detektor: 1x Bluetooth-Adapter Kl.1)			
30 km/h	2	4	6
40 km/h	1	2	3
50 km/h	1	2	3
60 km/h	0	2	2
Summe	4	10	14
Messfahrt 2 (Detektor: 2x Bluetooth-Adapter Kl.1)			
30 km/h	0	3	3
40 km/h	1	3	4
50 km/h	2	1	3
60 km/h	0	3	3
Summe	3	10	13
Messfahrt 3 (Detektor: 3x Bluetooth-Adapter Kl.1)			
30 km/h	0	2	2
40 km/h	1	0	1
50 km/h	1	1	2
60 km/h	1	1	2
Summe	3	4	7

Gut zu erkennen ist auch die Verteilung der Erfassungen zwischen den Abschnitten vor bzw. hinter dem Messaufbau. Es zeigt sich, dass wesentlich mehr Erfassungen in Abschnitt 2, also auf der Fahrt weg vom Messaufbau, wahrgenommen werden im Vergleich zur Fahrt auf den Messaufbau zu. Dies traf insbesondere bei der Nutzung von einem bzw. zwei Bluetooth-Adaptern zu - so wurden bei beiden Messfahrten im Abschnitt 2 jeweils mehr als doppelt so viele Erfassungen registriert im Vergleich zu Abschnitt 1.

Betrachtet man die Anzahl der Erfassungen über die verschiedenen Geschwindigkeiten hinweg, fällt auf, dass zumindest bei der Verwendung von einem Bluetooth-Adapter der Klasse 1 die Häufigkeiten der Erfassung mit steigender Geschwindigkeit abnehmen. Je langsamer ein Fahrzeug am Messaufbau vorbeifährt, desto mehr Zeit verbringt es im Erfassungsbereich und umso mehr Zeit steht für die Erfassung zur Verfügung. Bei einer Geschwindigkeit von 30 km/h hält sich das Fahrzeug etwa 12 Sekunden innerhalb des Erfassungsgebietes auf – bei Messfahrt 1 wurde somit im Durchschnitt bei einer Geschwindigkeit von 30 km/h alle 2 Sekunden das Gerät erkannt. Mit Zunahme der Anzahl der ver-

wendeten Bluetooth-Adapter schwimmt dieser Unterschied innerhalb einer Messfahrt zwischen den verschiedenen Geschwindigkeiten jedoch – die Anzahl der Erfassungen bleibt in den unterschiedlichen Geschwindigkeiten pro Messfahrt beinahe konstant. Vergleicht man dagegen die Anzahl der Erfassungen für die gleichen Geschwindigkeiten über alle Messfahrten hinweg zeigt sich jedoch, dass diese abnimmt je mehr Bluetooth-Adapter zum Einsatz kommen.

Zusammengefasst ergibt sich somit, dass geringere Geschwindigkeiten generell eine höhere Wahrscheinlichkeit zur erfolgreichen Erfassung von Fahrzeugen mit Bluetooth-fähigen Geräten implizieren. Unabhängig davon konnte zudem eine höhere Anzahl an Erfassungen im Abschnitt 2 festgestellt werden, d.h. dass die Wahrscheinlichkeit für die Erfassung des Fahrzeugs hinter dem Messaufbau bzw. während der Fahrt weg vom Messaufbau größer ist.

Darüber hinaus zeigte sich, dass auch in diesen Messungen in Abhängigkeit von der Anzahl der verwendeten Bluetooth-Detektoren, die Anzahl der Erfassungen variierte. So wurde die Anzahl der Erfassungen umso geringer, je mehr Bluetooth-Adapter der Klasse 1 für den Empfang zur Verfügung standen. Die Erwartung, dass mehrere, zur Verfügung stehende Detektoren mehr Frequenzen abdecken und daher die Wahrscheinlichkeit einer Erkennung steigt, konnte damit auch hier nicht belegt werden. Die Vermutung liegt daher wie schon bei den Freiflächenmessungen nahe, dass es sich hierbei um Effekte gegenseitiger Störungen zwischen den verschiedenen Bluetooth-Adaptoren handelt, die insbesondere bei geringen Abständen zwischen den Detektoren zu Tage treten.

6.1.3 Zwischenfazit

Folgende Erkenntnisse konnten auf Basis der prototypischen Testreihen im Vorfeld der empirischen Hauptuntersuchung dieser Arbeit festgehalten werden:

- Die Erkennungsraten der Bluetooth-Adapter (Klasse 2) liegen bei etwa 6% des Gesamtverkehrsaufkommens.
- Die Wiedererkennungsraten liegen diesbezüglich bei ca. 3% und entsprechen damit der Hälfte der per Bluetooth erfassbaren Fahrzeuge.
- Die Reisezeiten der erfassten Fahrzeuge können auf Basis der Wiedererkennung der entsprechenden MAC-Adressen berechnet werden und zeigen eine relativ gute Übereinstimmung mit der Realität.
- Die Detektionsreichweiten variieren je nachdem, wo das zu detektierende Gerät positioniert ist (außer- oder innerhalb eines Fahrzeuges) und sind offenbar auch von der Anzahl der Detektoren und deren Abständen untereinander abhängig.
- Die benötigten Inquiry-Zeiten nehmen mit steigender Entfernung zu.

- Eine Verkürzung der Inquiry-Zeiten durch Nutzung mehrerer parallel geschalteter Bluetooth-Detektoren konnte zunächst nicht eindeutig nachgewiesen werden. Als mögliche Ursache werden hier Effekte gegenseitiger Störung zwischen den Detektoren angenommen.
- Je geringer die Geschwindigkeit sich bewegender Fahrzeuge ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit einer Erfassung.
- Die Wahrscheinlichkeit einer Erfassung sich bewegender Fahrzeuge innerhalb des Erfassungsradius ist zudem im Abschnitt 2, d.h. also in der Fahrt weg vom Detektor, höher. Eine Ausrichtung der Detektoren entgegen der Fahrtrichtung, vorzugsweise mit gerichteter Antenne, ist demnach vorteilhaft.

Die extrahierten Erkenntnisse bilden die Basis für die im Folgenden erläuterten empirischen Untersuchungen und wurden, sofern umsetzbar, in den Versuchsaufbau integriert.

Abschließend sei angemerkt, dass ausgehend von den zuvor erläuterten Ergebnissen Grund zu der Annahme besteht, dass sich nahe beieinander befindliche Detektoren gegenseitig beeinflussen. Es sollte daher eine umfassende Untersuchung von Störfaktoren, insbesondere von Effekten gegenseitiger Störung zwischen mehreren Bluetooth-Detektoren sowie Auswirkungen der Abstände zwischen diesen erfolgen. Dies ist jedoch nicht Bestandteil der in dieser Arbeit vorliegenden empirischen Untersuchungen. Ebenso können witterungsbedingte Störeffekte nicht ausgeschlossen werden. Sie bedürfen daher ebenfalls einer eingehenden Analyse, die im Rahmen dieser Arbeit jedoch auch nicht erbracht werden soll.

6.2 Vorbereitung der Messungen zur Untersuchung spezieller Kenngrößen

Im Rahmen dieses Kapitels erfolgt die eingehende empirische Untersuchung einzelner Verkehrskenngrößen anhand eines speziellen Versuchsaufbaus an einem Knotenpunkt. Dieser Teil der Arbeit spiegelt damit die Hauptuntersuchung und somit den empirischen Schwerpunkt wider.

Es wird zunächst die Vorgehensweise hinsichtlich der Datenerhebung, d.h. insbesondere des Messaufbaus und der Durchführung der Messungen, erläutert. Im Anschluss wird auf die Datenaufbereitung als wesentlichen Teil der Vorbereitung der Messwertauswertung sowie auf die für die Datenauswertung relevanten Aufgaben eingegangen. Die Darstellung der Ergebnisse sowie deren Interpretation erfolgt schließlich in Einzelkapiteln getrennt nach den jeweiligen Untersuchungsschwerpunkten. Sofern für die Auswertung der einzelnen Kenngrößen spezielle, weitere Verarbeitungsschritte von Nöten waren, werden diese ebenfalls vorgestellt und ihre Sinnfälligkeit erläutert.

6.2.1 Datenerhebung

Der für die Hauptuntersuchung ausgewählte Messstandort befindet sich ebenfalls unweit des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt in Berlin und stellt die östliche Be-

grenzung der DLR-Messstrecke dar. Für die Messungen wurde eine doppelte T-Kreuzung gewählt, die pro T-Kreuzung mit Lichtsignalanlagen ausgestattet ist zwischen denen ein kurzer Stauraum von etwa 100 Metern liegt. Die betrachtete Kreuzung verbindet den Wissenschaftsstandort Berlin-Adlershof mit den Stadtgebieten Altglienicke und Köpenick und dient über die Verlängerung in Form des Ernst-Ruska-Ufers als Zugang zur Stadtautobahn. Die Hauptrichtung (Adlergestell/ Ernst-Ruska-Ufer) ist gekennzeichnet durch einen pro Richtung 2-spurigen Ausbau. Die anderen Knotenpunktzufahrten (Am Studio und Köpenicker Str./Altglienicker Brücke) sind hingegen pro Richtung nur 1-spurig ausgebaut. Die für die Messungen verwendeten Bluetooth-Detektoren (sog. Bluetooth-Boxen; Abk. Blub), wurden jeweils in den vier Zufahrten sowie einer etwa in der Mitte zwischen beiden T-Kreuzungen an Laternenmasten in einer Höhe von ca. 3 Metern installiert. Für die Messung in der Knotenpunktzufahrt ‚Am Studio‘ wurde als Anbringungsort ein Messfahrzeug des DLR genutzt, da für die in dieser Zufahrt stehenden Laternen keine Genehmigung erteilt werden konnte. Die Details zu den Messstandorten wurden bereits in Abschnitt 5.2.1 erläutert und können darüber hinaus zusammengefasst den Messstandort-Steckbriefen in Anlage I entnommen werden.

Aufbau und Funktionsweise der Detektoren entsprechen der Beschreibung in Abschnitt 4.1. Es wurden Bluetooth-Adapter der Klasse 1 verwendet, die über die angeschlossene Stummelantenne einen Radius von ca. 100 Metern abdecken. Die Datenspeicherung erfolgte intern über eine SD-Karte – die Daten konnten dementsprechend erst nach vollständiger Datenerhebung ausgelesen werden.

Zeitraum der Datenerhebung war vom 20.03.2011 bis 29.03.2011 über jeweils 24 Stunden pro Tag, wobei jedoch nur die Datensätze, die zwischen dem 21.03.2011 und dem 25.03.2011 erhoben wurden, Eingang in die empirische Untersuchung fanden.

6.2.2 Datenaufbereitung

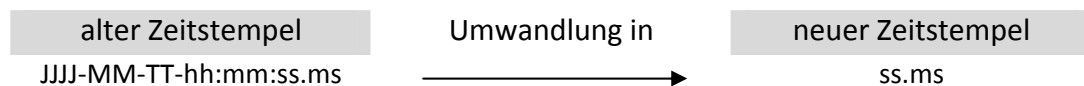
Die erhobenen Daten lagen zunächst in ihrer ursprünglichen Form als Datensätze in einer Textdatei des spezifischen Dateiformats ‚*.btinq‘ bestehend aus folgenden Komponenten vor:

Zeitstempel	MAC-Adresse	RSSI
JJJJ-MM-TT-hh:mm:ss.ms	z.B.: 00:24:7D:50:1C:0C	z.B.: -89

Alle Datensätze eines Detektors über sämtliche Messtage befanden sich zunächst in einer einzigen Datei. Zur Erleichterung der Handhabung und Erhöhung der Übersichtlichkeit wurden die Datensätze daher zunächst manuell nach Tagen getrennt und in Einzeldateien gespeichert.

Anschließend erfolgte die Aufbereitung der Daten mit Hilfe eines Programms (MAC-Parser), das die vorhandenen Datensätze entsprechend des Schemas in Anlage M aufbereitet.

Das schematisch dargestellte Programm fügt die pro Detektor tageweise vorliegenden Dateien wiederum für jeweils einen Tag zusammen, sodass schließlich Dateien für jeden Messtag mit den Datensätzen aller Detektoren existieren. Um die Information des Ursprungs eines Datensatzes, also die Zuordnung zum jeweiligen Detektor, dabei nicht zu verlieren, wird jedem Datensatz zusätzlich die entsprechende Detektor-ID angehängt. Zudem werden die vorliegenden Zeitstempel umgewandelt, sodass die Zeitangabe nicht mehr das Datum enthält, sondern lediglich die Uhrzeit in Sekunden und Millisekunden wiedergibt. Das Mitführen des Datums ist aufgrund der bereits durchgeführten Trennung der Datensätze nach Tagen nicht mehr notwendig.



Da die Datensätze in ihrer Ursprungsform auch noch Mehrfacherfassungen der MAC-Adressen enthalten und daher von der Anzahl der Datensätze nicht per se auf die tatsächliche Menge an erfassten Bluetooth-Geräten geschlossen werden kann, erfolgt in einem zweiten Schritt eine Reduzierung der MAC-Adressen. Ausgehend von der MAC-Adresse des ersten Datensatzes werden alle folgenden Datensätze nach einer Wiederholung dieser MAC-Adresse durchsucht. Wird die MAC-Adresse ein weiteres Mal gefunden, erstellt das Programm eine neue Liste und ordnet dem Zeitstempel der Erst-Erkennung der jeweiligen MAC-Adresse alle weiteren Zeitstempel der Wiedererkennungen sowie die dazugehörigen Detektor-IDs und RSSI-Werte zu. Danach löscht das Programm in der alten Liste alle gefundenen Datensätze der zuvor gesuchten MAC-Adresse und betrachtet die nächsten MAC-Adressen, mit denen in gleicher Art und Weise verfahren wird. Die Funde aller weiteren betrachteten MAC-Adressen werden ebenfalls in der neu angelegten Liste abgelegt, sodass nach dem Durchsuchen der gesamten Datensätze eine neue Datei entstanden ist, die nicht mehr nach dem Zeitstempel sondern nach den einzelnen MAC-Adressen geordnet ist. Innerhalb einer MAC-Adressen-Auflistung bleibt die Sortierung nach Zeitstempel jedoch weiterhin erhalten. Tabelle 11 veranschaulicht den Vorgang.

Tabelle 11: Veranschaulichung der Datensortierung

Zeitstempel [ss.ms]	MAC-Adresse	RSSI	Detektor-ID
40462.616	00:00:00:B2:D5:C4	-83	1
40466.772	00:00:00:B2:D5:C4	-83	1
40466.812	00:00:00:B2:D5:C4	-80	1
40475.556	00:00:00:B2:D5:C4	-85	4
40475.586	00:00:00:B2:D5:C4	-81	4
40475.868	00:00:00:B2:D5:C4	-86	4
40478.151	00:00:00:B2:D5:C4	-83	4
40478.462	00:00:00:B2:D5:C4	-58	4
40478.702	00:00:00:B2:D5:C4	-72	4
40479.125	00:00:00:B2:D5:C4	-72	4
40479.635	00:00:00:B2:D5:C4	-73	4

Zeitstempel [ss.ms]	MAC-Adresse	RSSI	Detektor-ID
40490.533	00:00:00:B2:D5:C4	-80	3
40490.793	00:00:00:B2:D5:C4	-89	3
40491.435	00:00:00:B2:D5:C4	-85	3
46118.764	00:00:00:B3:4F:BD	-88	2
46119.376	00:00:00:B3:4F:BD	-86	2
46119.956	00:00:00:B3:4F:BD	-80	2
46120.307	00:00:00:B3:4F:BD	-83	2
46120.578	00:00:00:B3:4F:BD	-83	2
46120.959	00:00:00:B3:4F:BD	-82	2
...

Anschließend wird die so vorsortierte Liste nochmals reduziert, indem pro MAC-Adresse lediglich der Zeitstempel der ersten und der letzten Erkennung, der RSSI der Ersterkennung sowie die Detektor-IDs aller Erkennungen in Form einer Sequenz (entspricht der Aneinanderreihung aller Einzelwerte entsprechend ihrer Reihenfolge) als ein einzelner Datensatz verbleiben. Zum besseren Verständnis ist die oben exemplarisch aufgeführte Liste in Tabelle 12 entsprechend reduziert.

Tabelle 12: Veranschaulichung der Reduzierung der sortierten Liste

MAC-Adresse	RSSI	Zeitstempel der ersten Erkennung [ss.ms]	Zeitstempel der letzten Erkennung [ss.ms]	Sequenz
00:00:00:B2:D5:C4	-83	40462.616	40491.435	143
00:00:00:B3:4F:BD	-88	46118.764	46120.959	2
...

Für die Datenauswertung wurde die reduzierte Liste dann in das Programm ‚Excel‘ eingelesen. Die gesamte Prozedur wurde für sämtliche Tage angewandt, sodass entsprechend der fünf Messtage letztendlich fünf Excel-Dateien erstellt wurden, in denen die Auswertung der Daten nach einem einheitlichen Schema durchgeführt werden konnte.

6.2.3 Datenauswertung

Das Schema der Datenauswertung für die im Weiteren durchgeführten Untersuchungen in Excel sieht nacheinander abzuarbeitende bzw. aufeinander aufbauende Analyse-Schritte vor, die sich pro Excel-Datei im Anlegen von Reitern (Tabellen) mit den nachstehenden Inhalten äußern.

Anlegen je eines Reiters mit:

- Ursprungsdaten,
- Berechnung der Quelle-Ziel-Beziehungen [OD-Berechnung],
- Zusammenfassung und Darstellung der Ergebnisse der Quelle-Ziel-Berechnungen [OD-Matrix],

- Berechnung der Reisezeiten für jede MAC-Adresse [Reisezeit],
- Histogramm der Reisezeiten [dt-Histogramm],
- Histogramm der Wiedererkennungen über den jeweiligen Tag [Wiedererkennung],
- Bestimmung der Mittelwerte der Reisezeiten für jede Stunde [dt_Mittelwert],
- Bestimmung der Mediane der Reisezeiten für jede Stunde [dt_Median],
- Zusammenstellung der Reisezeiten und dazugehörigen Stundenwerte als Vorbereitung für ein dreidimensionales Reisezeiten-Histogramm mit Tageszeitenbezug [ti,dt-Histogramm (1)],
- Zusammenfassung der Ergebnisse und Darstellung des dreidimensionalen Reisezeiten-Histogramms mit Tageszeitbezug [ti,dt-Histogramm (2)],
- Berechnung der Geschwindigkeiten für jede MAC-Adresse, die nur an einem einzigen Detektor erfasst wurde [Geschwindigkeit],
- Zusammenfassung der Ergebnisse in Bezug auf jeden Detektor und Erstellung von Geschwindigkeits-Histogrammen über den Tag für jeden Detektor [Geschwindigkeit_Diagramme].

Das Anlegen der Reiter dient einerseits der Strukturierung der Datenauswertung sowie andererseits der Erhöhung der Übersichtlichkeit und Nachvollziehbarkeit. In kompakter Darstellung konnten so in lediglich fünf Dateien alle relevanten Ergebnisse der Messdaten eines jeden Tages zusammengefasst werden.

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der einzelnen Reiter erläutert und interpretiert. Aufgrund der Fülle an Material werden nur einzelne, exemplarisch ausgewählte Diagramme und Tabellen dargestellt. Das Bildmaterial befindet sich in den Anlagen O, P, Q und R.

6.3 Durchführung der Messungen am Testfeld „Ernst-Ruska-Ufer“

6.3.1 Untersuchung der Erfassungsrate

Die Erfassungsrate entspricht dem prozentualen Anteil der mittels eines Bluetooth-Detektors erfassten Fahrzeuge am Gesamtverkehrsaufkommen. Da ein Bluetooth-Detektor ressourcenbedingt nur Fahrzeuge, die mit Geräten mit aktivierter Bluetooth-Schnittstelle ausgestattet sind, erfassen kann, entspricht die mit Bluetooth erfasste Verkehrsmenge nicht dem tatsächlichen Gesamtverkehrsaufkommen.

Die reinen Erkennungsmengen pro Detektor und Tag sind in Abbildung 30 dargestellt. Die Zahlen sind für jeden Detektor über alle Messtage weitestgehend konstant und verdeutlichen damit die Stetigkeit in der Funktionsweise der Detektoren.

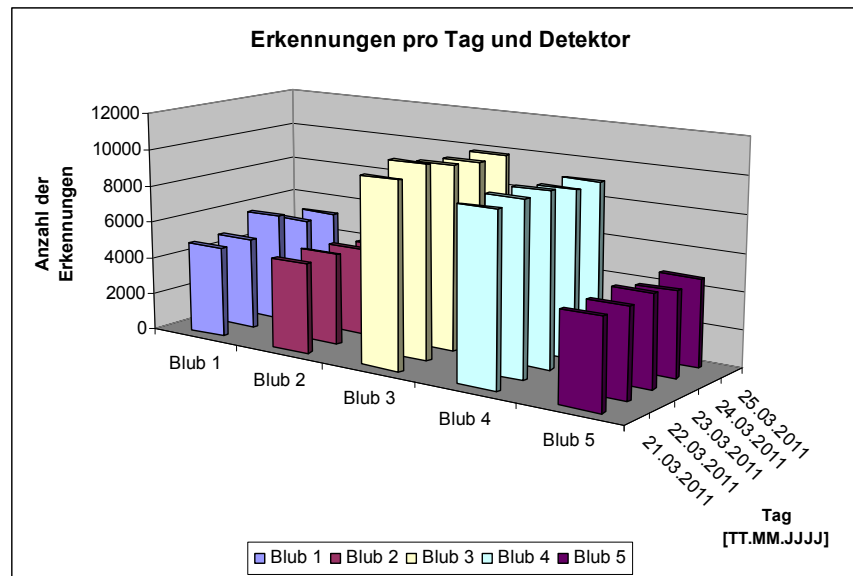


Abbildung 30: Anzahl der erfassten Fahrzeuge pro Detektor und Tag

Es ist zu erkennen, dass die beiden Detektoren Blub 3 und 4 mit etwa 9000 pro Tag erfassten Datensätzen deutlich mehr Fahrzeuge detektieren als die anderen drei Detektoren. Deren Erkennungsmengen liegen bei etwa 4000 Fahrzeugen je Tag und damit um mehr als die Hälfte unter der Verkehrsmenge der beiden zuvor genannten Detektoren. Als Grund hierfür wird die Lage der jeweiligen Detektoren angenommen. Blub 3 und 4 liegen in Staubereichen, die die Fahrzeuge in den meisten Fällen erfahrungsbedingt langsamer passieren. Zudem liegen sie auf der Hauptverkehrsachse des betrachteten Messstandortes. Detektor 1, der ebenfalls auf dieser Hauptverkehrsstrecke liegt, jedoch ebenfalls wesentlich weniger Fahrzeuge je Tag erfasst, ist dagegen an einem Punkt der Knotenpunktzufahrt positioniert, an dem nur in seltenen Fällen Stau zustande kommt. Die Zufahrten, in denen die Detektoren Nummer 2 und 5 liegen, sind vergleichsweise gering befahren, sodass deren ermittelte Verkehrsmengen als durchaus realistisch im Vergleich zu den anderen eingestuft werden können.

Um nun den Anteil an dem Gesamtverkehrsaufkommen zu bestimmen, muss dieses zunächst über ein Referenzsystem ermittelt werden. Als Referenzsystem wurden in diesem Fall Doppel-Induktivschleifendetektoren ausgewählt, die auf der Messstrecke des DLR bereits eingebaut waren und idealer Weise in unmittelbarer Nähe zu den installierten Bluetooth-Detektoren platziert sind (siehe Abbildung 31).

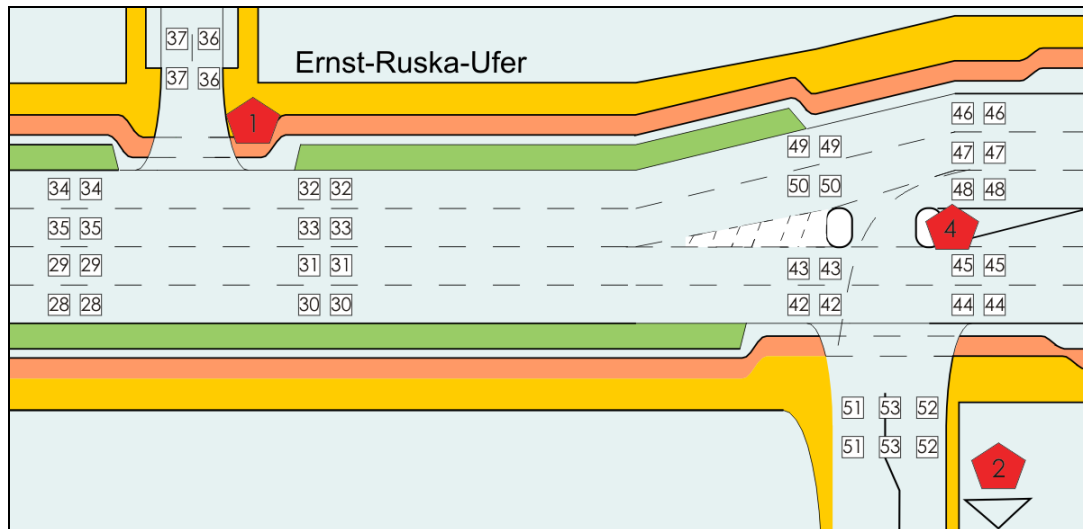


Abbildung 31: Übersicht mit Schleifen und markierten Blubs
sowie Bezeichnung der Schleifen mit Nummern

Die fest installierten Induktionsschleifendetektoren erheben über die Verstimmung eines elektromagnetischen Feldes, das durch das Überfahren der Schleife mit einem Fahrzeug metallischer Masse gestört wird, Einzelfahrzeugdaten. Aufgrund des jahrelangen Einsatzes und der damit verbundenen Erfahrungen gelten Induktionsschleifen als verlässliche Quelle und können daher als Referenzsystem genutzt werden.

Da nicht an allen Knotenpunktzufahrten Doppel-Induktionsschleifen verfügbar sind, kamen für die Untersuchung der Erfassungsrate nur die Bluetooth-Detektoren 1, 2 und 4 in Betracht. Die dazugehörigen Nummern der Referenzdetektoren sind in Tabelle 13 zusammengefasst. Die Schleifendetektoren, die für die Ermittlung der Erfassungsrate Anwendung fanden, sind zudem farbig markiert.

Tabelle 13: Blubs und dazugehörige Schleifendetektoren-Nummern

zugeordnete Schleifen- Detektoren (Querschnitte)	Bluetooth-Detektoren																					
	Blub 1									Blub 2			Blub 4									
	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	51	52	53	42	43	44	45	46	47	48	49	50

Die Induktionsschleifendetektoren des DLR sind mit einem Server verbunden, der die Daten in einer Datenbank ablegt. Aus dieser Datenbank können die Daten schließlich abgerufen werden. Auf Basis dessen wurden für die entsprechenden Messtage die mittels der Induktionsschleifendetektoren parallel erhobenen Verkehrsstärken getrennt nach Messtagen extrahiert.

Die Erfassung mit Bluetooth-Detektoren stellt eine stationäre, querschnittsbezogene Erfassung dar, die nicht nach Spur oder Richtung der Fahrbahn trennt. Die Induktionsschleifendetektoren wiederum sind spur- und richtungsbezogen platziert. Das bedeutet, dass

pro Spur und Richtung jeweils eine Doppel-Induktionsschleife existiert. Für eine ebenfalls querschnittsbezogene Datenangabe wurden daher die Daten der entsprechenden Induktionsschleifen tageweise summiert. Die Auflistung aller relevanten Daten sowie die tageweise Gegenüberstellung dieser Daten kann der Tabelle in Anlage N entnommen werden.

Mit den querschnittsbezogenen Daten der Bluetooth-Detektoren und der Doppel-Induktivschleifendetektoren konnte dann anhand des Vergleichs der jeweiligen Verkehrsmengen die mit Hilfe der Bluetooth-Detektoren erreichbare Erfassungsrate bestimmt werden. Die prozentualen Anteile an der Gesamtverkehrsmenge, die die jeweiligen Bluetooth-Detektoren an den verschiedenen Messtagen erreicht haben, sind in Tabelle 14 zusammengefasst.

Tabelle 14: Erfassungsraten je Detektor und Tag in Prozent

Datum	Blub 1	Blub 2	Blub 4
21.03.2011	21,51%	49,68%	29,88%
22.03.2011	21,26%	50,66%	29,98%
23.03.2011	25,84%	49,66%	30,76%
24.03.2011	22,53%	46,31%	29,23%
25.03.2011	22,73%	45,86%	29,50%
statistische Kenngrößen			
Mittelwert	22,77%	48,43%	29,87%
Median	22,53%	49,66%	29,88%
Maximum	25,84%	50,66%	30,76%
Minimum	21,26%	45,86%	29,23%
Spannweite	4,58%	4,80%	1,53%
durchschnittliche Abweichung	1,23%	1,88%	0,40%
Varianz	0,00033339	0,00047851	3,37208E-05
Standardabweichung	1,83%	2,19%	0,58%

Je nach Detektor konnten insgesamt Erfassungsraten zwischen 20 % (Blub 1) und 50 % (Blub 2) erreicht werden. Die erzielten Erfassungsraten sind bezogen auf die jeweiligen Detektoren über die gesamte Messdauer relativ konstant und streuen mit Standardabweichungen zwischen 0,58 % und 2,19 % nur sehr gering. Abbildung 32 verdeutlicht diese Konstanz grafisch.

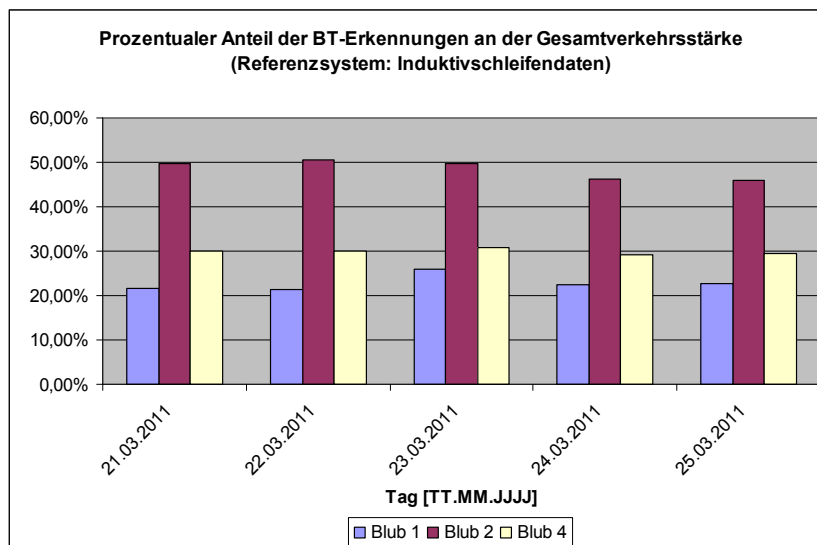


Abbildung 32: grafische Darstellung der prozentualen Verteilungen der Erfassungsraten je Detektor und Tag

Im Vergleich zu den Ergebnissen der Messstrecken-Tests (siehe Abschnitt 6.1.2), bei denen sich die Erfassungsrate auf ca. 6,4 % belief, liegen die prozentualen Anteile dieser Messungen deutlich über den Erwartungen und bestätigen damit die in der einschlägigen Literatur angegebenen Erfassungsraten von 20 % bis 40 %.

Als Ursache für die positiven Ergebnisse wird insbesondere das gewählte Messfeld selbst angesehen. Im Kreuzungs- bzw. kreuzungsnahen Bereich fahren die Fahrzeuge langsamer - es steht somit mehr Zeit für die Erfassung zur Verfügung. Damit steigt wiederum die Wahrscheinlichkeit einer Erfassung, sodass die Erfassungsrate im Kreuzungsbereich gegenüber einer geraden, unbeeinflussten Strecke zunimmt.

Hinzu kommt die Spezifikation der verwendeten Bluetooth-Adapter. In den prototypischen Messstrecken-Tests kamen Adapter der Klasse 2 zur Anwendung, wohingegen die Hauptuntersuchung mit Bluetooth-Adaptoren der Klasse 1 durchgeführt wurde. Die damit einhergehende Vergrößerung des Erfassungsradius erhöht ebenfalls die zur Verfügung stehende Erfassungszeit und spielt damit gleichermaßen eine wesentliche Rolle für die Generierung höherer Erfassungsraten.

Insgesamt sind die ermittelten Erfassungsraten als äußerst positiv einzuordnen. Erkennungsraten in dieser Größenordnung bescheinigen den Bluetooth-Detektoren eine ausreichende Eignung im Sinne der Erfassung von Tendenzen des Verkehrsaufkommens und bestätigen damit die Zweckmäßigkeit hinsichtlich einer schnellen und vor allem kostengünstigen Variante der Verkehrserfassung. Die prozentualen Anteile genügen, um Rückschlüsse auf die Gesamtverkehrssituation zu ziehen und implizieren daher ein ausreichendes Maß an Verlässlichkeit.

6.3.2 Untersuchung der Wiedererkennungsrate

Die Eignung eines Detektors zur Wiedererkennung eines speziellen Fahrzeuges impliziert die Fähigkeit desselben auf ein eindeutiges Merkmal dieses Fahrzeuges zu reflektieren. Aufgrund der Eineindeutigkeit der MAC-Adresse eines elektronischen Gerätes mit Bluetooth-Schnittstelle sind Bluetooth-Detektoren in der Lage, solche Wiedererkennungen zu realisieren. Diese Fähigkeit besaßen im Straßenverkehr bisher nur Kamerasysteme mit denen eine Fahrzeugverfolgung per Kennzeichenerfassung verwirklicht wurde.

Die Wiedererkennung eines Fahrzeuges bedeutet dessen mehrfache Erfassung. Als Wiedererkennungen werden bei der Detektion mittels Bluetooth sowohl die mehrfachen Erkennungen an einem einzigen Detektor, als auch die erneute Detektion einer bestimmten MAC-Adresse an verschiedenen Detektorstandorten gewertet. Dabei können Wiedererkennungen an mehreren Detektoren jedoch auch die innerhalb dessen stattfindende mehrfache Erkennung an den einzelnen Detektoren einbeziehen. Mit Hilfe der den Datensätzen zugeordneten Detektor-ID bzw. der sich bei der Reduktion der Datensätze ergebenden Detektor-ID-Sequenz kann innerhalb der Daten zwischen beiden Wiedererkennungsarten unterschieden werden.

Um zunächst die absoluten Wiedererkennungsmengen zu bestimmen, wurden einerseits die Datensätze mit Mehrfacherkennungen an verschiedenen Detektoren sowie andererseits die Datensätze mit mehrfacher Erfassung an einem einzigen Detektor, wobei es unabhängig war, um welchen Detektor es sich konkret handelte, selektiert. Diese Selektion über den Stunden des Tages kann für alle fünf Messtage der Abbildung 33 entnommen werden. Es ist dabei zu erkennen, dass die Menge der Wiedererkennungen für alle Tage bis auf den 21.03.2011 nahezu identische Verläufe liefert, die jeweils einen deutlichen Peak im Bereich des morgendlichen Berufsverkehrs zeigen. Eine Ursache für die spezielle Ausprägung konnte nicht festgestellt werden.

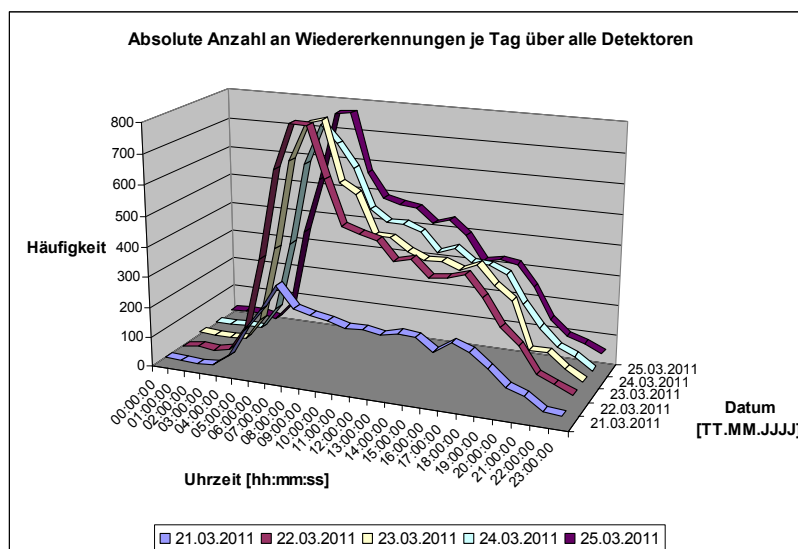


Abbildung 33: absolute Wiedererkennungsmengen über den Tag

Anschließend wurden beide Selektionen in jeweils einem Histogramm über den Stunden des Tages separiert abgetragen (in Abbildung 34 exemplarisch für den 23.01.2011 dargestellt). Hier zeigt sich, dass insbesondere die Verteilung der Wiedererkennungen bezogen auf mehrere Detektoren über den Tag schwankt. Das Wiedererkennungs-Histogramm bezogen auf einen einzigen Detektor weist hingegen eine konstante Verteilung für die verkehrlich relevanten Stunden des Tages auf, die sich anhand des Verkehrsaufkommens erklärt.

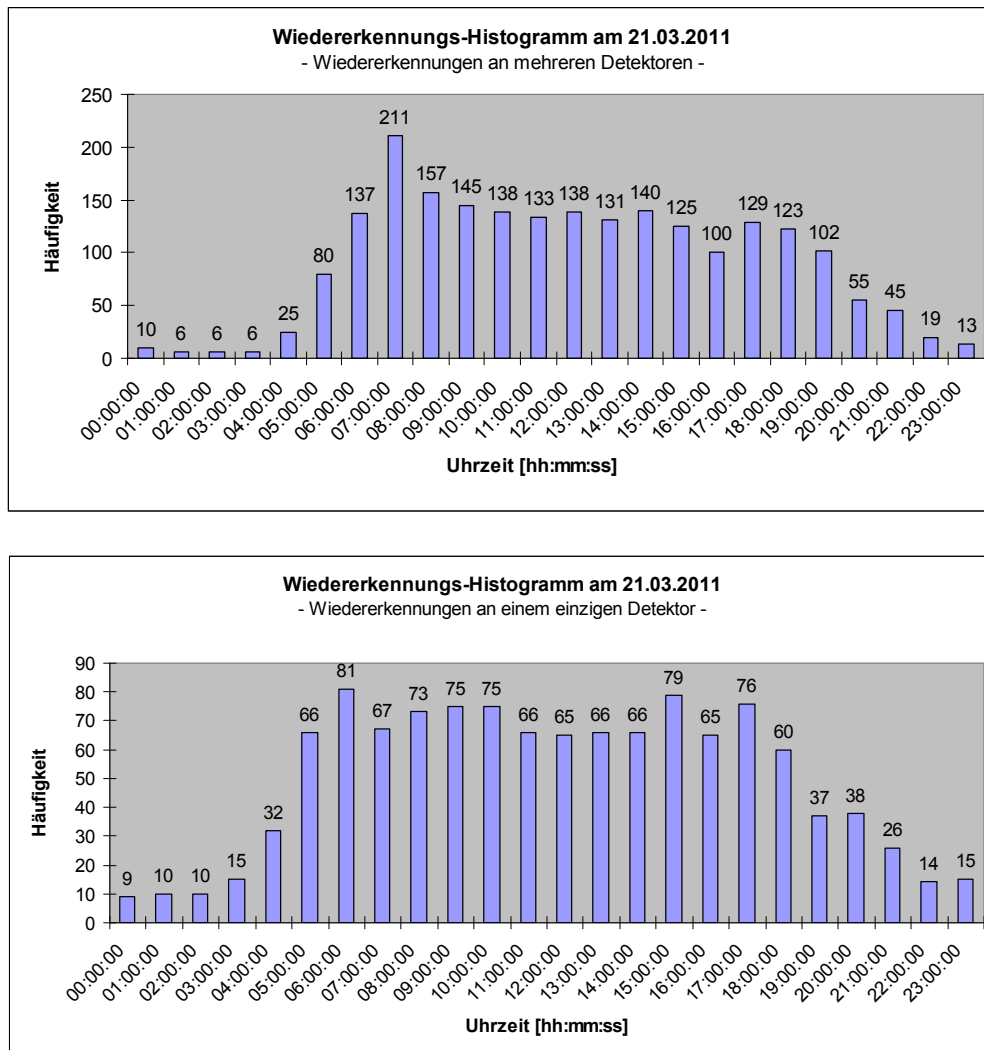


Abbildung 34: separate Darstellung der Verteilung der absoluten Wiedererkennungen über den Tag bezogen auf mehrere sowie für einen Detektor

Da nicht jedes mit Bluetooth ausgestattete Fahrzeug automatisch wiedererkannt wird, wenn es einmal erfasst wurde, nimmt die Wiedererkennungsrate wiederum nur einen gewissen prozentualen Anteil der mit Hilfe der Bluetooth-Detektoren erkannten Fahrzeuge ein. Die Wiedererkennungsrate bildet damit eine Untermenge der Erfassungsrate ab. Für die Bestimmung der Wiedererkennungsrate wurden daher in dieser Untersuchung nur die Bluetooth-Detektoren betrachtet für die auch die Erfassungsraten ermittelt werden konnten. Das bedeutet, dass bezogen auf die an den drei Detektoren 1, 2

und 4 erfassten Fahrzeugmengen nochmals die Anzahl der sowohl an Detektor 1 als auch Detektor 2 (respektive zwischen den Relationen 1 und 4 sowie 2 und 4) erkannten Fahrzeuge bestimmt wurde. Der Richtungsbezug blieb dabei unbeachtet. Als maximale Zeitdifferenz zwischen den Wiedererkennungen wurde ein Maximum von 120 Sekunden angesetzt.

Über den Vergleich der ermittelten absoluten Erfassungsmengen an den jeweiligen Detektoren und der Wiedererkennungsmengen zwischen diesen konnte schließlich die Wiedererkennungsrate für die betrachteten Relationen ermittelt werden (siehe Abbildung 35).

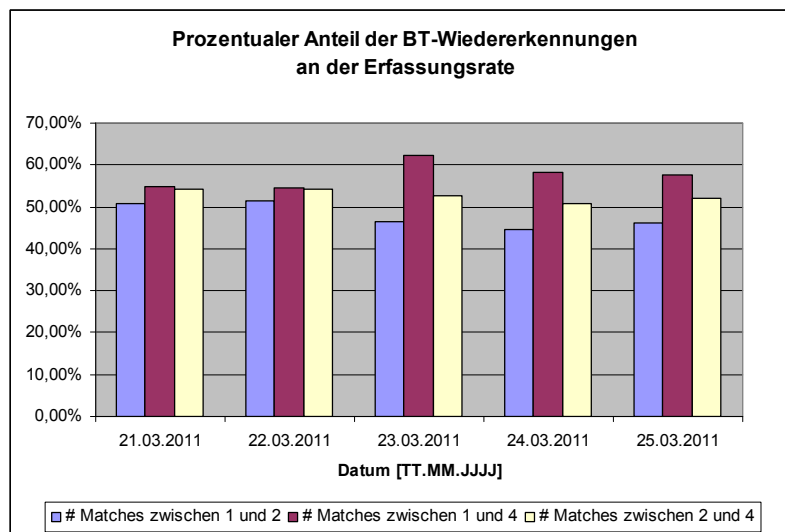


Abbildung 35: Wiedererkennungsraten

Es ist gut zu erkennen, dass sich die Wiedererkennungsraten im Bereich der 50 %-Marke bewegen. Das heißt, dass von den insgesamt mittels Bluetooth erfassten Fahrzeugen jedes zweite nochmals an einem der anderen beiden Detektoren wiedererkannt wurde. Dieses Ergebnis bekräftigt die in den Messstrecken-Tests (siehe Abschnitt 6.1.2) herausgestellten Erkenntnisse nach denen ebenfalls die Hälfte der zuvor an der ersten Messbrücke erkannten Fahrzeuge nochmals an der zweiten detektiert wurden.

Mit Hilfe der Wiedererkennung von Fahrzeugen können im Weiteren spezielle, fahrzeugbezogene Kenngrößen erfasst werden. So wird es einerseits möglich, die benötigten Reisezeiten der einzelnen, erkannten Fahrzeuge exakter zu ermitteln (siehe dazu auch Abschnitt 6.3.4). Andererseits können damit die Quelle-Ziel-Relationen der erfassten Fahrzeuge bestimmt werden (siehe Abschnitt 6.3.3). Eine hohe Wiedererkennungsrate erhöht diesbezüglich die Aussagekraft der Daten. Kann man davon ausgehen, dass etwa die Hälfte der erfassten Fahrzeuge wiedererkannt wird, können Tendenzen hinsichtlich dieser beiden Kenngrößen erkannt und quantifiziert werden.

6.3.3 Untersuchung der Quelle-Ziel-Relationen

Quelle-Ziel-Relationen bilden den zurückgelegten Weg eines erfassten Fahrzeuges, d.h. dessen Trajektorie, ab. Mit ihrer Hilfe kann die Verteilung der Routenströme, die auf der Ermittlung der Häufigkeit genutzter Quelle-Ziel-Relationen basiert, in einem Netz oder wie im vorliegenden Untersuchungsfall an einem Knotenpunkt bestimmt werden.

Die Bestimmung der Quelle-Ziel-Relationen baut auf der im vorherigen Abschnitt 6.3.2 erläuterten Fähigkeit der Bluetooth-Detektoren zur Wiedererkennung, d.h. der eindeutigen Identifikation eines Fahrzeuges anhand der MAC-Adresse des mitgeführten Bluetooth-Gerätes, auf. Über die Wiedererkennungen an den verschiedenen Detektorstandorten kann das Bewegungsprofil der erfassten Fahrzeuge nachvollzogen werden. Mit Hilfe des bei der Erfassung hinzugefügten Zeitstempels kann dann wiederum die zeitliche Abfolge der abgefahrenen Detektorstandorte und somit die Quelle-Ziel-Relation der jeweiligen MAC-Adresse bestimmt werden.

Für die Untersuchung der Quelle-Ziel-Relationen erfolgte zunächst eine Selektion nach sinnvollen Wiedererkennungsrelationen (siehe Abbildung 36).

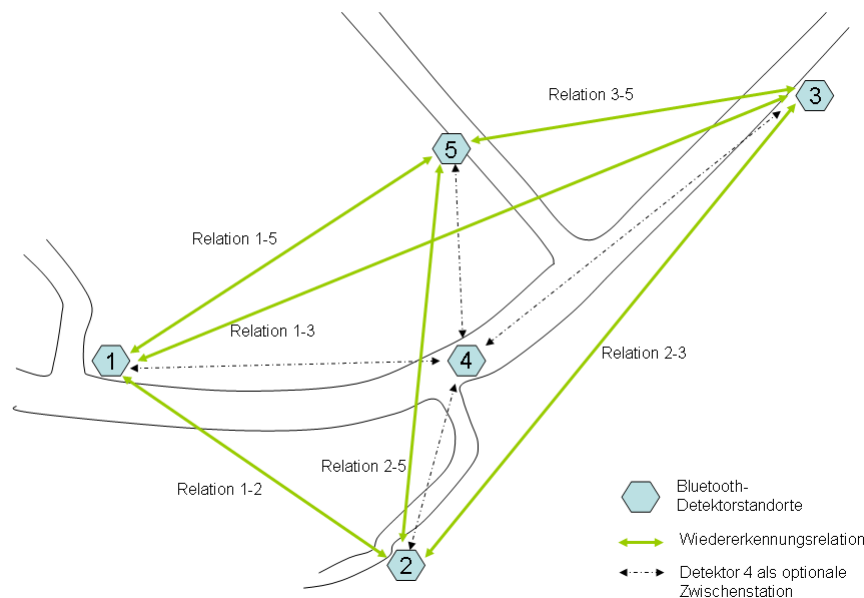


Abbildung 36: sinnvolle Wiedererkennungsrelationen

Die Nutzung sinnvoller Wiedererkennungsrelationen bedeutet eine Plausibilisierung der Datensätze dahingehend, dass nur Datensätze, deren Detektor-ID-Sequenz aus einem Wert (d.h. nur Erfassung an einem Detektor) oder Sequenzen bestehend aus maximal 3 Stellen (d.h. Erfassung an mehreren Detektoren, jedoch mit der Einschränkung von maximal 3 Detektionsstandorten) in die Untersuchung einbezogen wurden. Die Reduzierung auf Sequenzen, die die Erkennung an maximal 3 Detektorstandorten implizieren, liegt darin begründet, dass aufgrund der Art und Weise der Datenaufbereitung in den Datensätzen auch Sequenzen, die einen ganzen Tag abbilden, enthalten sind. Solche Sequenzen stellen beispielsweise das Bewegungsprofil eines Fahrzeuges dar, das morgens auf

dem Weg zur Arbeit und dann erst wieder abends bei der Rückfahrt detektiert wurde. Insbesondere im Hinblick auf die Plausibilisierung der im Weiteren vollzogenen Reisezeitenbestimmung (siehe Abschnitt 6.3.5) wurden diese langen Sequenzen für diese Untersuchungen zunächst herausgefiltert. Die so vollzogene Plausibilisierung schließt zwar einerseits einen Teil der Datensätze aus der Betrachtung aus, andererseits bewirkt sie eine erhöhte Eindeutigkeit und damit einhergehend Aussagekraft hinsichtlich der von den Fahrzeugen genutzten Quelle-Ziel-Relationen sowie der späterhin berechneten Reisezeiten. Für die selektierten Wiedererkennung relations wurden schließlich die Häufigkeiten des Auftretens innerhalb der Datensätze bestimmt und die daraus resultierende Häufigkeitsverteilung in einer Matrix, der sog. O-D- (Origin-Destination)-Matrix zusammengefasst (siehe Abbildung 37). Das Aufstellen der O-D-Matrix erfolgte einzeln für jeden Tag des Messzeitraums. Die O-D-Matrizen aller Tage können im Anlage O eingesehen werden. Zur Veranschaulichung wurde an dieser Stelle exemplarisch Mittwoch, den 23.03.2011, gewählt. Die Zahlen, die sich auf den Detektorstandort 4 beziehen, sind grau abgebildet, da dieser Standort aufgrund seiner zentralen Lage nicht wie die anderen Standorte als Beginn oder Ende einer Trajektorie gewertet werden kann. Der Vollständigkeit halber wird er jedoch ebenfalls aufgeführt. Ferner sind die Fahrzeugmengen, die nur an einem der Detektoren erkannt wurden, in der Diagonalen der Matrix grau unterlegt dargestellt.

O-D-Matrix für Mittwoch, den 23.03.2011						
von \ nach	1	2	3	4	5	Summe
1	93	17	407	35	9	561
2	19	18	93	25	25	180
3	683	173	915	129	232	2132
4	22	19	73	49	9	172
5	9	20	158	5	42	234
Summe	826	247	1646	243	317	3279

Abbildung 37: Quelle-Ziel-Matrix für Mittwoch, den 23.03.2011

Anhand der Matrix lässt sich bereits eine deutliche Richtungspräferenz festmachen. So bewegt sich der Großteil der Fahrzeuge aus Richtung bzw. in Richtung des Messstandortes Nummer 3, gefolgt von Detektor Nummer 1. Das bedeutet, dass die meisten Fahrzeuge die Relation 1 – 3 befahren. Dabei spielt es keine Rolle, ob sich die Fahrzeuge von Detektor 3 kommend in Richtung Detektor 1 oder umgekehrt bewegen. Mit dem Wissen, dass es sich bei dieser Relation um die Hauptrichtung des betrachteten Knotenpunktes handelt, wird das Ergebnis plausibel und nachvollziehbar. Um die jeweiligen Beziehungen zwischen den Detektoren zu verdeutlichen, wurden die Ergebnisse in Form von Kiviat-Diagrammen (siehe Abbildung 38) grafisch aufbereitet.

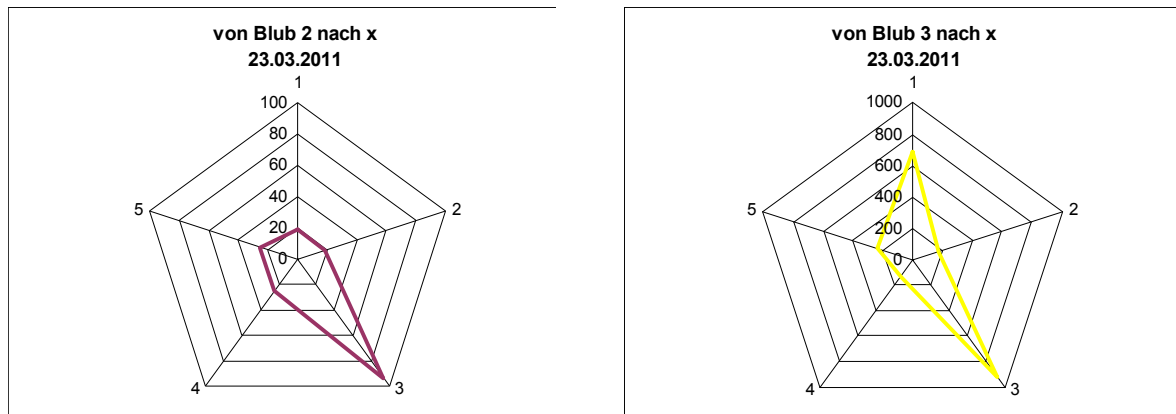


Abbildung 38: Kiviat-Diagramme zur grafischen Veranschaulichung
der Verteilung der Routenströme

In den Kiviat-Diagrammen sind die Relationen aus Sicht des Ursprungsdetektors, d.h. des Detektors an dem die MAC-Adressen zuerst detektiert wurden, dargestellt. Die einzelnen Hauptäste im Diagramm entsprechen den Detektorstandorten respektive der möglichen Richtung, in die sich die beim ersten Detektor erfassten Fahrzeuge bewegen können. Die Zwischenverzweigungen bilden das Maß der Häufigkeit ab. Die dargestellte Kurve zeigt somit die Richtung an, in der sich die erfassten Fahrzeuge vom betrachteten Detektor aus gesehen weiterbewegt haben und gibt deren Häufigkeit wider. So zeigt das Diagramm in Abbildung 38 für die Verteilung der aus Richtung des Detektors 2 kommenden Routenströme für den 23.03.2011, dass die meisten der erfassten Fahrzeuge an Detektor 3 erneut erfasst wurden. Die anderen Richtungen wurden dagegen wesentlich weniger, jedoch im Vergleich untereinander mit etwa gleichverteilten Fahrzeugmengen befahren. Betrachtet man die Verteilung der Routenströme für Detektor 3 zeigt sich, dass der Großteil der Fahrzeuge nochmals an Detektor 3, knapp gefolgt von Detektor 1 wiedererkannt wurde. Die prozentuale Verteilung der Routenströme für alle Detektoren basierend auf den insgesamt je Detektor erfassten Fahrzeugmengen ist ebenfalls exemplarisch für den 23.03.2011 in Abbildung 39 dargestellt. Die Ergebnisse des exemplarisch ausgewählten Tages verhalten sich für alle weiteren Messtage in analoger Art und Weise und weichen kaum voneinander ab (siehe dazu Anlage O).

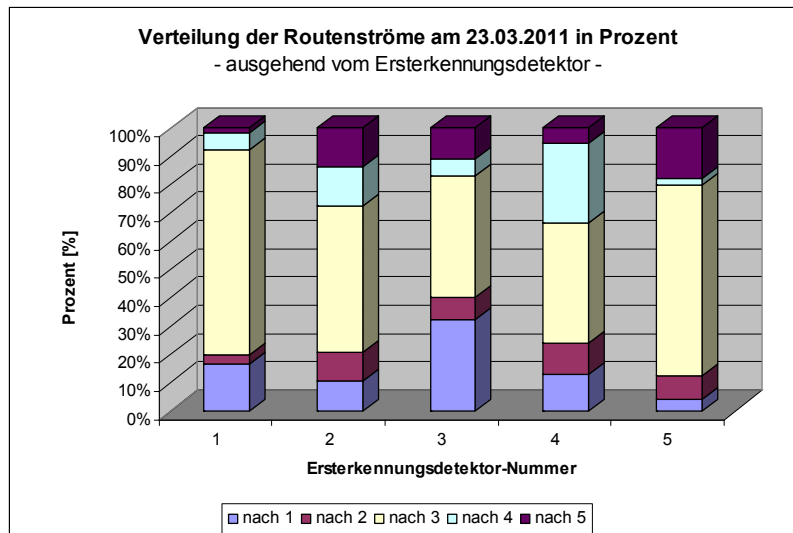


Abbildung 39: Prozentuale Verteilung der Routenströme für den 23.03.2011

Aufgrund der bereits beleuchteten Bluetooth-Erfassungsrates, die geringer ausfällt als die tatsächliche Gesamtverkehrsstärke, spiegeln die Ergebnisse der O-D-Matrix nicht die wahre Verteilung sondern nur eine Tendenz wider. Um nun zu ermitteln, ob diese Tendenz zutreffend ist, wird wieder das Referenzsystem der Induktivschleifendetektoren bemüht. Auch in diesem Fall kann eine Referenzierung nur dort erfolgen, wo Referenzdetektoren vorhanden sind. Dies trifft wiederum für die Detektoren 1, 2 und 4 zu. Der Referenzierung dient an dieser Stelle lediglich die Relation zwischen den Detektoren 1 und 2. Die zu dieser Relation gehörende Verteilung der Routenströme wird über die in unmittelbarer Nähe zum Detektor 4 befindlichen Doppelinduktionsschleifen betrachtet. Detektor 4 wird selbst nicht in die Betrachtungen eingebunden, da dieser als Zwischenstation der Hauptrelationen (in Abbildung 36 grün dargestellt) dient. Aufgrund der Aufbereitung der Bewegungsprofile als Sequenzen werden bei der Aufstellung der O-D-Matrix die Sequenzen, die den Bluetooth-Detektor Nummer 4 als Zwischenstation beinhalten ebenfalls zu den Hauptrelationen gezählt. Das bedeutet gleichzeitig, dass für die reine Betrachtung der Relation zwischen den Detektoren 1 (bzw. 2,3,5) und dem in der Kreuzungsmitte befindlichen Detektor 4 nur die Sequenzen 14 und 41 (bzw. 24, 42 / 34, 43 / 54, 45) gewertet werden. Tatsächlich nutzen jedoch wesentlich mehr Fahrzeuge diese Relation, da sie als Zwischenstation zur Erreichung der anderen Stationen unerlässlich ist. Daher erfolgt an dieser Stelle keine Referenzierung der Verteilung der Routenströme zwischen den Detektoren 1 und 4 bzw. 2 und 4.

Abbildung 40 enthält die über die Induktionsschleifen erfassten Referenzdaten sowie die daraus berechnete Verteilung der Ströme. Dabei spiegeln die roten Zahlen die erhobenen Daten wider, wohingegen die schwarzen Zahlen die berechnete Verteilung ausdrücken. Während der Berechnung wurde für die aus Richtung des Ernst-Ruska-Ufers detektierten Verkehrsmengen festgestellt, dass die Induktivschleifendetektoren an der Knotenpunktzufahrt fehlerbehaftete Werte liefern. Die erfassten Fahrzeugmengen fallen hier deutlich zu gering aus. Anhand der Berechnungen ergaben sich wesentlich höhere

Werte, die im Abgleich mit den auf dem Ernst-Ruska-Ufer auf Höhe des Detektors 1 liegenden Induktionsschleifen-Daten als korrekte Referenzgröße angenommen wurden. Da sie jedoch nur berechneten Ursprungs sind, wurden diese Zahlen in grau abgebildet (die tatsächlich an dieser Stelle erhobene Verkehrsmenge wurde zusätzlich in Klammern darunter angegeben).

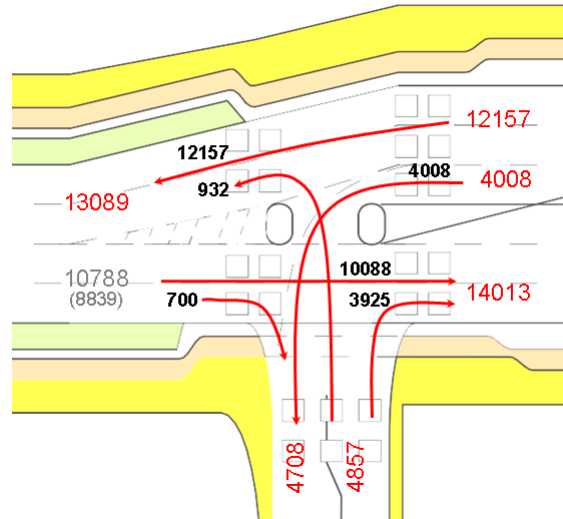


Abbildung 40: Verteilung der Routenströme auf Basis der Referenzmessung für den 23.03.2011

Die absoluten und prozentualen Anteile, die die berechneten Verteilungsgrößen der Induktivschleifendaten an den Gesamtverkehrsstärken der betrachteten Relationen besitzen, sind innerhalb der Tabelle 15 in der Spalte mit der Bezeichnung ‚Referenz‘ dargestellt. Die mit Bluetooth ermittelten Anteile sind diesen gegenübergestellt.

Tabelle 15: Gegenüberstellung der absoluten und prozentualen Anteile der Verteilung der Routenströme für den 23.03.2011

Relationen	Referenz		Bluetooth	
	absolut	prozentual	absolut	prozentual
1 -> 2	932	19,19%	19	10,56%
2 -> 1	700	6,49%	17	3,03%

Es zeigt sich, dass die prozentuale Verteilung der mit den jeweiligen Systemen erfassten Verkehrsmengen für die betrachteten Relationen am 23.03.2011 in einem Verhältnis von etwa 2:1 lag. So fuhren laut Referenzsystem 20 % der erfassten Fahrzeuge aus Richtung des Detektors 1 in Richtung des Detektors 2. Die entsprechende Bluetooth-Messung konnte jedoch lediglich einen prozentualen Anteil von 10 % feststellen. Entsprechend verhält es sich mit der anderen Richtung, d.h. von Detektor 2 kommend zum Detektor 1. Zum Vergleich sind die prozentualen Anteile aller Tage ebenfalls unterschieden nach Ursprung (Referenzsystem oder Bluetooth-Detektoren) nochmals in Tabelle 16 zusammengefasst.

Tabelle 16: Zusammenfassung der prozentualen Verteilungen der Routenströme je Tag

	1 -> 2			2 -> 1		
	Referenz	Bluetooth	Abweichung	Referenz	Bluetooth	Abweichung
21.03.2011	6,37%	1,74%	4,63%	19,12%	6,90%	12,22%
22.03.2011	6,25%	2,38%	3,87%	19,53%	5,16%	14,37%
23.03.2011	6,49%	3,03%	3,46%	19,19%	10,56%	8,63%
24.03.2011	4,85%	1,32%	3,53%	17,76%	6,82%	10,94%
25.03.2011	6,75%	1,50%	5,25%	18,87%	6,06%	12,81%
Mittelwerte	6,14%	1,99%	4,15%	18,89%	7,10%	11,79%

Die Zusammenfassung zeigt diesbezüglich jedoch erhebliche Unterschiede in den Verhältnissen. So fallen die prozentualen Anteile für das Bluetoothsystem für die anderen Tage wesentlich geringer aus und liegen mit einem Verhältnis von 4:1 deutlich unter den Ergebnissen der Daten vom 23.03.2011. Ein konkreter funktionaler Zusammenhang ist an dieser Stelle nicht ableitbar – die Standardabweichungen zwischen den Messtagen betragen für die einzelnen Erfassungssysteme ca. 0,70 % (bei Bluetooth für die Relation von Detektor 2 zu Detektor 1 sogar 2,06 %). Hinzu kommt, dass die Menge der Stichproben im Hinblick auf konkrete Aussagen zu gering ausfällt.

Abschließend kann gesagt werden, dass die mit Bluetooth erstellten O-D-Matrizen durchaus einen gewissen Trend widerspiegeln können. Eine Basis für verkehrsplanerische Zwecke können sie jedoch unter diesen Bedingungen nicht darstellen. Hierfür sind auch die prozentualen Anteile der Verteilung der Routenströme im Vergleich zum Referenzsystem zu schwach ausgeprägt. Diese weichen noch stark von den Referenzmessungen ab und können daher nicht als belastbare Größen gelten. Eine sinnvolle Ergänzung wäre diesbezüglich die Untersuchung der an diesem Knotenpunkt genutzten Hauptrichtung auf der wesentlich mehr Fahrzeuge erfasst wurden und die daher möglicherweise eine höhere Übereinstimmung hinsichtlich der prozentualen Anteile bei der Verteilung der Routenströme bieten könnte.

6.3.4 Untersuchung der Reisezeiten

Die Reisezeit gibt den Zeitraum, den ein Fahrzeug zur Überbrückung eines Wegstückes benötigt hat, wider. Im Gegensatz zur reinen Fahrtzeit, die nur die Zeit des Fahrens darstellt, beinhaltet die Reisezeit die gesamte für eine Wegstrecke benötigte Zeit unabhängig davon, ob auf dem Weg angehalten und erst nach einer gewissen Zeit weitergefahren wurde.

Die Reisezeit eines erfassten Fahrzeuges entspricht in Bezug auf die Detektion mit Bluetooth somit der Zeitdifferenz zwischen der ersten und der letzten Detektion. Diese wurde für alle pro Tag vorhandenen Datensätze berechnet. Das heißt, in diesem Fall wurden auch die Sequenzen in die Berechnung einbezogen, die Relationen mit zeitversetzten Hin- und Rückfahrten widerspiegeln.

Zunächst wurden aufbauend auf den Reisezeitberechnungen stundenweise gemittelte Reisezeiten für jede Stunde des Tages ermittelt. Die Verteilung der Reisezeitmittelwerte

ist in Abbildung 41 dargestellt. Die Zuordnung zu den Tageszeiten erfolgte anhand des Zeitstempels der Ersterkennung.

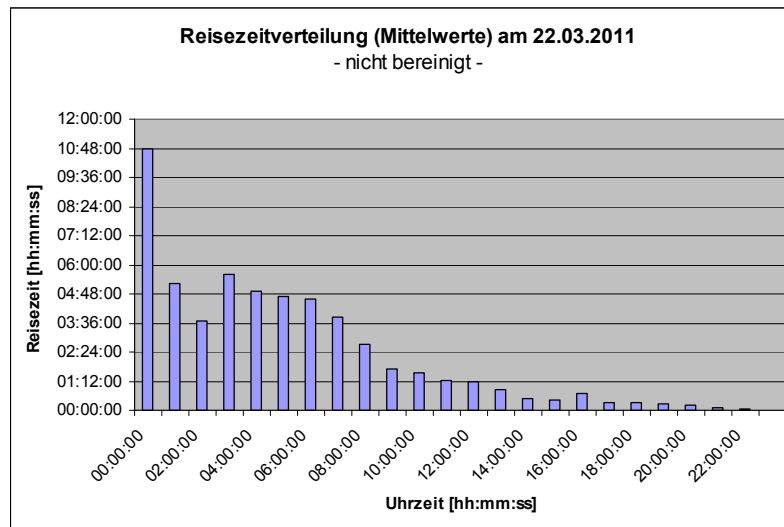


Abbildung 41: Verteilung der Reisezeit-Mittelwerte (nicht bereinigt) für den 22.03.2011

Entgegen der Erwartungen zeigen sich insbesondere in den frühen Morgenstunden zwischen 0:00 und 4:00 Uhr erhöhte Reisezeiten von bis zu knapp 11 Minuten. Dies ist jedoch aufgrund sehr geringer Verkehrsmengen und einer dementsprechend geringen Auslastung des Knotenpunktes nicht realistisch. Als Ursache für diese Verzerrung kann die Einbeziehung der Sequenzen mit zeitlich stark versetzten Hin- und Rückfahrten gesehen werden. So benötigte beispielsweise am 22.03.2011 um 0:00 Uhr ein Fahrzeug laut Reisezeitberechnung 24 Stunden. Unter der Bedingung, dass es sich um die zeitversetzte Hin- und Rückfahrt handelt, mag das realistisch sein. Als Reisezeit für die Überbrückung des betrachteten Knotenpunktes jedoch nicht. Daher wurden die Reisezeitmittelwerte in einem zweiten Schritt bereinigt. Zur Bereinigung wurden alle Reisezeiten, die größer als 10 Minuten waren, aus den Datensätzen herausgefiltert. Die anschließende nochmalige Berechnung der Reisezeit-Mittelwerte für jede Stunde des Tages zeigte in der Folge ein weitaus zutreffenderes Bild des Verkehrsgeschehens (siehe Abbildung 42).

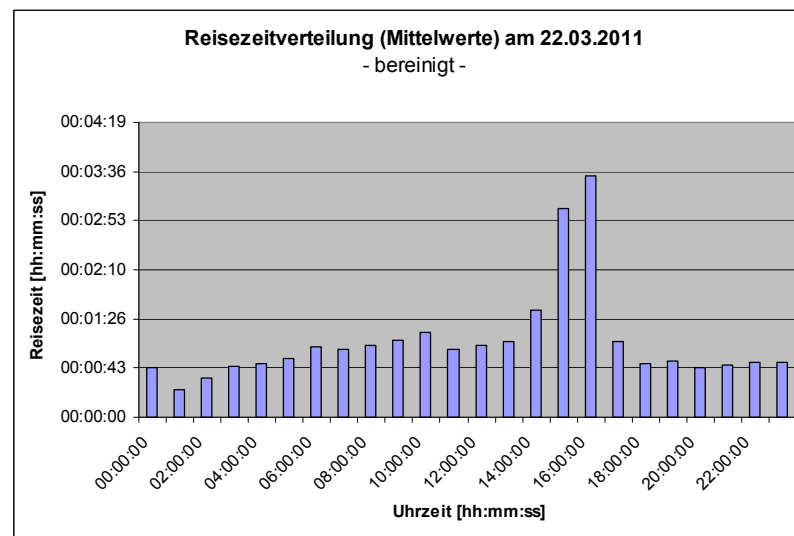


Abbildung 42: Verteilung der Reisezeit-Mittelwerte (bereinigt) für den 22.03.2011

Über die Filterung zu hoch, und damit unrealistischer Reisezeiten, werden die tatsächlichen für eine Fahrt benötigten Reisezeiten offensichtlich. Dies schließt jedoch nicht automatisch Sequenzen aus, in denen ein Fahrzeug mit einem kurzen Zeitversatz zwischen Hin- und Rückfahrt den Knotenpunkt befahren hat. Die Verteilung der bereinigten Reisezeiten zeigt nun zwischen 15:00 und 16:00 Uhr erhöhte Reisezeitwerte, die etwa im Bereich von 3 Minuten liegen. Dies scheint für Nachmittagsstunden, in denen bereits die Rush Hour einsetzt, dagegen nachvollziehbar.

Für Stichproben mit extremen Ausreißern bietet sich statt der Angabe der Mittelwerte die Betrachtung der Mediane an. Der Median, der den Zentralwert einer geordneten Stichprobe darstellt, ist robuster als der arithmetische Mittelwert. Ausreißer, die eine Stichprobe einseitig beeinflussen und daher den arithmetischen Mittelwert verzerren können, haben bei der Berechnung des Medians kaum einen Einfluss sofern genügend Messwerte vorliegen. Bei der Bestimmung der Mediane zeigte sich jedoch in diesem Fall wie bei den Mittelwerten eine Verfälschung der Ergebnisse insbesondere in den frühen Morgenstunden. Die Nutzung des robusteren Medians stieß auch hier aufgrund der zu geringen Datenmenge in den entsprechenden Stunden des Tages an ihre Grenzen. Daher erfolgte auch für die Mediane eine Bereinigung der Reisezeiten auf Werte unter 10 Minuten. Die nicht bereinigte sowie die bereinigte Variante der Verteilung der Reisezeit-Mediane pro Stunde sind in Abbildung 43 und Abbildung 44 dargestellt.

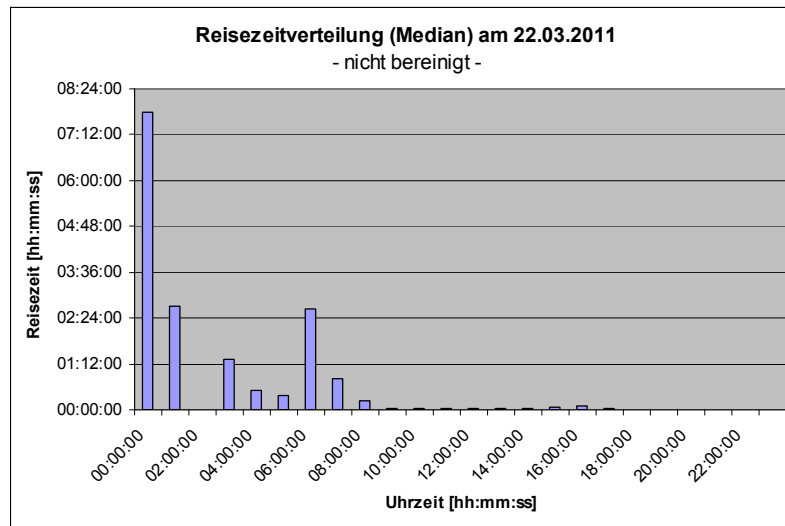


Abbildung 43: Verteilung der Reisezeit-Mediane für den 22.03.2011 (nicht bereinigt)

Im Vergleich zu den Mittelwerten spiegelt die Darstellung der Mediane eine wirklichere Verteilung der Reisezeiten über den Tag wider. Der Verlauf ist wesentlich ausgeprägter und offenbart auch für die morgendliche Rush Hour eine leichte Erhöhung der Reisezeiten. Die Reisezeiten der Rush Hour am Nachmittag sind weniger beeinflusst von Ausreißern und zeigen daher für die Zeit zwischen 15:00 und 16:00 Uhr maximale Reisezeiten von bis zu 2 Minuten.

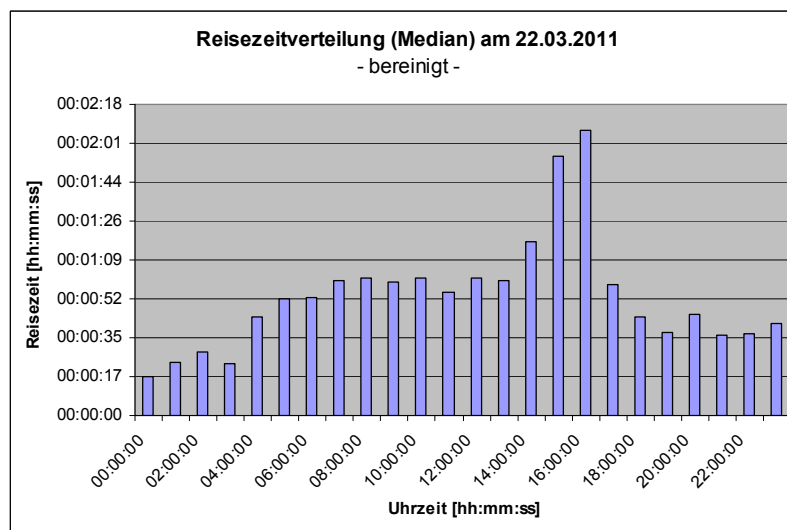


Abbildung 44: Verteilung der Reisezeit-Mediane für den 22.03.2011 (bereinigt)

Eine Referenzierung der ermittelten Reisezeiten konnte aufgrund der fehlenden Induktivschleifendetektoren an zwei der vier Knotenpunktzufahrten nicht nachvollzogen werden. Aus Erfahrungswerten heraus konnte jedoch eine Bestätigung der Größenordnungen der mit Bluetooth bestimmten Reisezeiten erfolgen.

Neben den gemittelten Reisezeitverläufen je Tag wurden für alle Messtage zusätzlich Reisezeiten-Histogramme erstellt, die die Verteilung der Häufigkeit von Reisezeiten-

Klassen darstellen. Als Reisezeit-Klassen gelten in diesem Zusammenhang Reisezeitwerte von 1 bis 25 Minuten sowie alle darüber hinaus gehenden Reisezeiten zusammengefasst in der Klasse ‚größer als 25 Minuten‘. Ein solches Histogramm zeigt somit, wie lange der Großteil der Fahrzeuge zur Überbrückung des betrachteten Knotenpunktes gebraucht hat. In Abbildung 45 ist solch eine Verteilung exemplarisch ebenfalls für Dienstag, den 22.03.2011 wiedergegeben. Es ist gut zu erkennen, dass ein Großteil der Fahrzeuge in die Reisezeit-Klasse von 1 Minute fällt. Das bedeutet, dass für diese Fahrzeuge eine Reisezeit zwischen 0 und 1 Minute für die Überbrückung der Kreuzung zutrifft. Auffällig ist gleichzeitig jedoch der große Anteil an Fahrzeugen, die laut Reisezeitberechnung mehr als 25 Minuten benötigt haben. Mit beinahe 400 Fahrzeugen mehr als bei der Reisezeit-Klasse von 1 Minute stellt diese Gruppe den größten Vertreter hinsichtlich der Verteilung der Reisezeit-Klassen dar. Dieses Ergebnis erschwert eine Beurteilung der tatsächlich zur Überbrückung des Knotenpunktes benötigten Reisezeit. Als Grund hierfür ist wiederum die Aufbereitung der erhobenen Datensätze in Einzeldatensätze je Mac-Adresse mit in Sequenzen zusammengefassten Erfassungsstandorten zu sehen. Bei langen Sequenzen mit Reisezeiten im Stundenbereich wäre daher eine Teilung des Datensatzes entsprechend einzelner Etappen sinnvoll, sodass beispielsweise für ein Fahrzeug, dass sowohl auf der Hinfahrt als auch auf der Rückfahrt erfasst wurde, letztendlich zwei Datensätze existieren. Im ersten Datensatz wäre dann die Hinfahrt, im zweiten die Rückfahrt fixiert. Die Reisezeiten würden sich dann entsprechend auf die Etappen beziehen und würden somit die wahren, pro Fahrt benötigten Reisezeiten widerspiegeln.

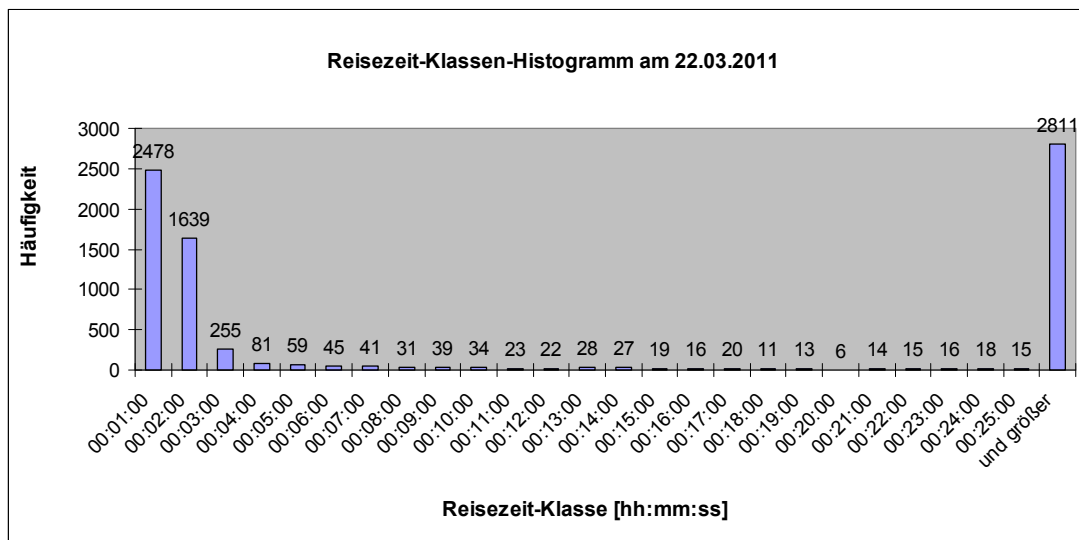


Abbildung 45: 2D-Reisezeit-Klassen-Histogramm für den 22.03.2011

Um abschließend den Bezug zwischen der Verteilung der Reisezeit-Klassen und der jeweiligen Tageszeit herzustellen, wurde das dargestellte 2-dimensionale Diagramm um die dritte Dimension, den Stunden des Tages, erweitert. Die gleichzeitige Zusammenführung der zeitlichen Verteilungen aller Reisezeit-Klassen über den Tag in einem einzigen, nun 3-dimensionalen Diagramm (siehe Abbildung 46) ermöglicht darüber hinaus deren Vergleichbarkeit untereinander. Statt der Aufschlüsselung der Reisezeit-Klassen bis zu 25

Minuten wurde hier im Hinblick auf die Übersichtlichkeit und Sinnfälligkeit der Reisezeiten eine maximale Reisezeit-Klasse von 15 Minuten gewählt. Alle weiteren Reisezeiten, die größer als 15 Minuten sind, wurden ebenfalls in diese Klasse integriert. Aus diesem Grund erscheint auch die 15-Minuten-Reisezeit-Klasse im Diagramm als zunächst nicht sinnfälliger Peak.

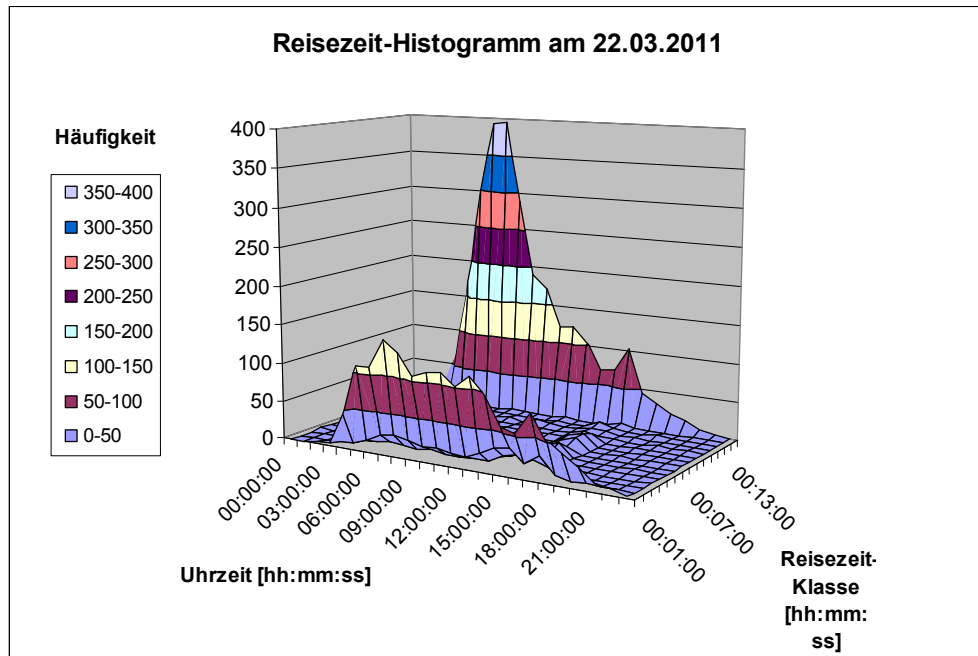


Abbildung 46: 3D-Reisezeiten-Histogramm für den 22.03.2011

Das 3-dimensionale Reisezeiten-Histogramm verdeutlicht nochmals die Dominanz der 1-Minuten-Reisezeit-Klasse, zeigt jedoch gleichzeitig das Verhalten der anderen Reisezeit-Klassen bezogen auf die Stunden des Tages. Die Häufigkeiten der anderen Reisezeit-Klassen sind im Vergleich zur 1-Minuten-Reisezeit-Klasse nur minimal ausgeprägt. Einzig in der Zeit zwischen ca. 13:00 und 18:00 steigen die Häufigkeiten der übrigen Reisezeit-Klassen etwas an, kommen jedoch nicht über die niedrigste Häufigkeitsstufe von 10 Fahrzeugen hinaus. Die Darstellung des 3-dimensionalen Diagramms als Oberflächen-Diagramm (entspricht der Ansicht des 3-D-Diagramms von oben), indem die Wertebereich über Farben voneinander getrennt sind, gibt diesen Aspekt noch deutlicher wider (siehe Abbildung 47). Auch hier erscheint die 15-Minuten-Reisezeit-Klasse mit höheren Häufigkeiten, was jedoch ebenfalls auf die Zusammenführung aller höheren Reisezeit-Klassen in dieser einen Klasse zurückzuführen ist und demnach eine Verzerrung darstellt, die nicht der Realität entspricht.

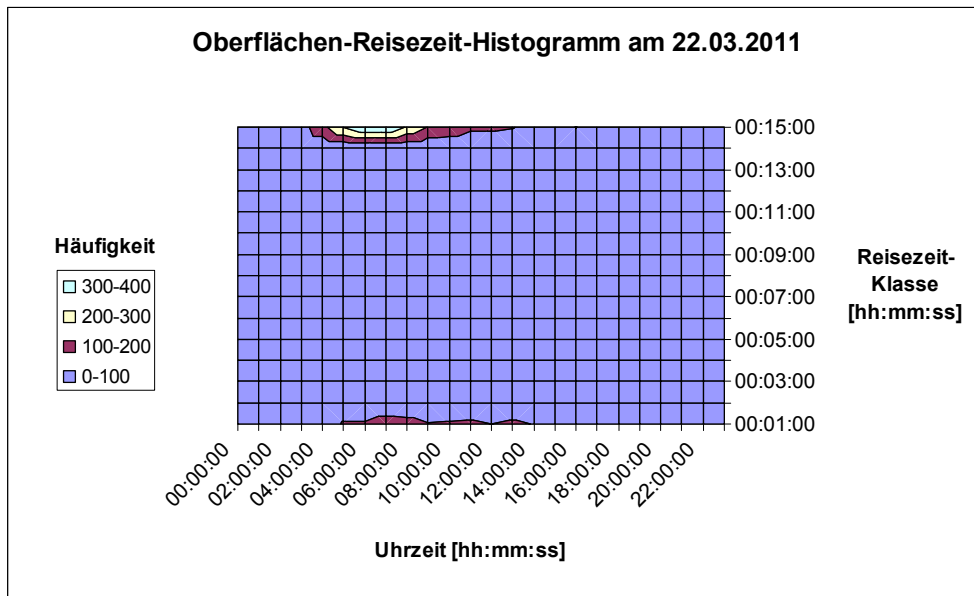


Abbildung 47: Oberflächenansicht des 3D-Diagramms für den 22.03.2011

Die hier dargelegten Diagramme zeigen speziell die Reisezeit-Verteilungen für Dienstag, den 22.03.2011. Die Diagramme der anderen Messtage sind ebenfalls in Anlage P aufgeführt. Vergleicht man die hier dargestellten Diagramme mit denen der anderen Messtage lässt sich feststellen, dass deren Reisezeit-Verteilungen ein analoges Verhalten zeigen.

Aufgrund der Häufigkeitsverteilung und der Wirklichkeitsnähe der Reisezeit-Klassen zwischen 1 und 5 Minuten, wurden diese Klassen in einem letzten Schritt nochmals explizit herausgegriffen, um deren Verläufe eingehender untersuchen zu können (siehe Abbildung 48).

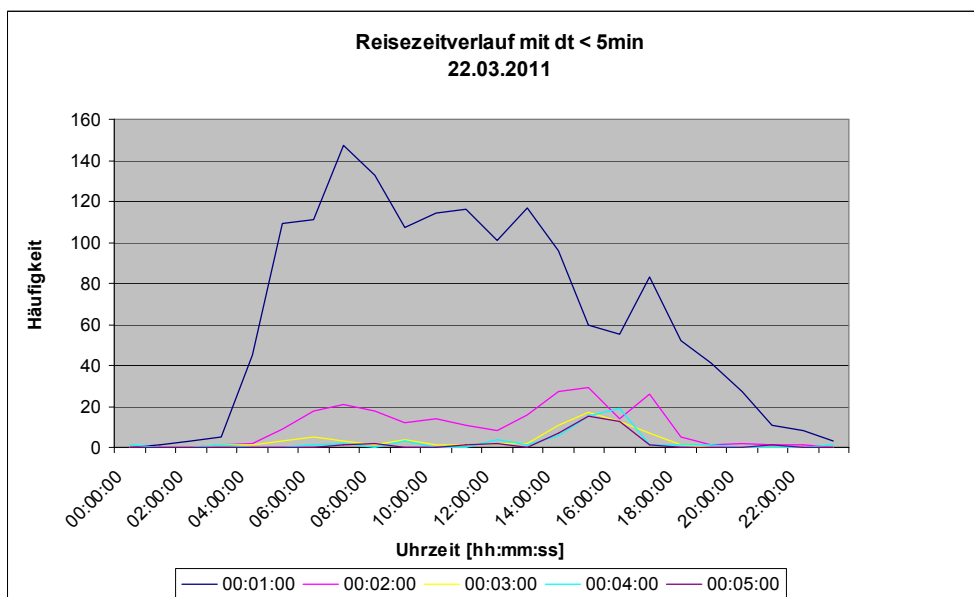


Abbildung 48: 2D-Diagramm mit Reisezeitverläufen für Reisezeiten ≤ 5 Minuten

Der Verlauf der Reisezeit-Klassen unter 5 Minuten stellt ein realitätsnahes Abbild des Verkehrsgeschehens dar. Mit der Abnahme der Häufigkeit der 1-Minuten-Reisezeit-Klasse steigt die Häufigkeit der anderen vier Reisezeit-Klassen entsprechend an. Dies ist insofern sinnfällig, als dass zu Zeiten erhöhten Verkehrsaufkommens die zur Überwindung des Knotenpunktes benötigte Zeit ansteigt. Reisezeiten von bis zu einer Minute existieren zwar weiterhin, jedoch hat die Menge an Fahrzeugen die in diese Klasse fallen stark abgenommen. Gleichzeitig ist zu erkennen, dass die Anzahl der Fahrzeuge, die bis zu zwei Minuten beanspruchen, zunimmt. Um ca. 16:00 Uhr sinkt auch die 2-Minuten-Reisezeit-Klasse plötzlich ab. Im gleichen Moment steigen dafür wiederum die anderen drei Reisezeit-Klassen von drei bis fünf Minuten. Etwa gegen 18:00 Uhr sinken dagegen die Reisezeit-Klassen über 3 Minuten wieder und die 1- und 2-Minuten-Reisezeit-Klassen steigen erneut an.

Insgesamt zeigt die Verteilung der Reisezeiten insbesondere für die Reisezeit-Klassen bis fünf Minuten eine gute Repräsentativität des vorliegenden Verkehrsgeschehens. Die Ermittlung von Reisezeiten mit Bluetooth-Detektoren stellt demnach eine verlässliche und damit sinnvolle Ergänzung für mit sonstigen Detektorsystemen wenig bzw. nicht ausgestattete Strecken, wie beispielsweise Umleitungsstraßen oder sonstige nur temporär stark genutzte Verbindungen dar auf denen ein zuverlässiges, kostengünstiges und zugleich leicht und schnell zu installierendes Erfassungssystem benötigt wird.

6.3.5 Untersuchung der Reisegeschwindigkeiten

Die Reisegeschwindigkeit stellt die als konstant angenommene Geschwindigkeit eines Fahrzeuges auf einem Wegstück dar. Engpässe auf dem betrachteten Wegstück, die eine momentane Verzögerung aufgrund geringerer gefahrener Geschwindigkeiten bedeuten, können damit nicht abgebildet werden.

Um die Reisegeschwindigkeit aus den erhobenen Datensätzen zu ermitteln, ist eine Mehrfacherkennung einer MAC-Adresse mit einem gewissen zeitlichen Abstand sowie das Wissen über den Abstand zwischen den Erkennungen notwendig. Hierzu kommen zwei Herangehensweisen in Frage. Einerseits kann die Geschwindigkeit für einen einzigen Detektor bestimmt werden, indem die erste und die letzte Erfassung als Ein- bzw. Austrittszeitpunkt aus dem Erfassungsbereich des Detektors gewertet werden. Der zurückgelegte Weg entspricht dann vereinfacht dem Durchmesser des Detektionsbereichs. Andererseits kann die Geschwindigkeit zwischen zwei Detektoren ermittelt werden, wenn deren Abstand zueinander bekannt ist. Die benötigte Zeitspanne ergibt sich hier aus dem jeweils ersten Zeitstempel der Erfassung je Detektor (siehe hierzu auch Kapitel 4.2.3, Abschnitt außerstädtische Kenngrößen, Punkt (2): Geschwindigkeit).

Für die vorliegende Untersuchung wurden zunächst aus den Datensätzen jedes Tages die Reisegeschwindigkeiten bezogen auf einen einzigen Detektor ermittelt. In die Geschwindigkeitsbetrachtung gingen daher nur Datensätze ein, bei denen eine mehrfache Erfassung an nur einem Detektor vorlag. Diese Filterung wurde über die Detektor-Sequenz re-

alisiert, d.h. nur Datensätze mit Sequenzen bestehend aus einer einzigen Zahl (entsprechend der Detektorkennzahl nur die Werte 1 bis 5) wurden gewertet. Aus den zum jeweiligen Datensatz gehörenden Zeitstempeln der Erst- und Letzterkennung wurde die pro MAC-Adresse benötigte Reisezeit bestimmt. Um bereits im Vorfeld unrealistische Geschwindigkeitswerte, die aufgrund der bereits erwähnten Wiedererkennung während der Hin- und Rückfahrt eines Fahrzeuges auftreten können, auszuschließen, erfolgte an dieser Stelle nochmals eine zweite Filterung. Dies sah vor, Reisezeiten im Stundenbereich sowie Minutenbereich über 5 Minuten zu eliminieren, da solche Aufenthaltszeiten im Detektionsradius eines einzigen Detektors für die untersuchten Messstandorte erfahrungsbedingt als realitätsfern gelten können. Die zur jeweiligen Reisezeit korrespondierende Wegstrecke wurde in diesem Fall näherungsweise mit dem Detektionsradius des Detektors gleichgesetzt. Da in den Messungen Bluetooth-Adapter der Klasse 1 verwendet wurden, entsprach die zurückgelegte Strecke einer Länge von 200 Metern. Mit der in Formel 9 angegebenen Berechnungsvorschrift konnte schließlich die Geschwindigkeit in Metern je Sekunde bestimmt werden.

$$v = \frac{d}{dt} = \frac{200m}{tf - ti} \quad [\text{m/s}]$$

Formel 9

wobei

- d = Durchmesser des Erfassungsbereichs
- dt = Zeitdifferenz
- tf = Zeitpunkt der letzten Erkennung
- ti = Zeitpunkt der ersten Erkennung

In seltenen Fällen können die ermittelten Reisezeiten extrem kurzen Erfassungsabständen entsprechen, die zum Teil im Bereich von 1 oder sogar 0 Sekunden liegen können. Unter der Annahme, dass innerhalb dieser Zeit der gesamte Detektionsbereich durchfahren wurde, würden sich Geschwindigkeiten ergeben, die weit über der in Städten zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h liegen. Es erfolgte daher eine dritte Filterung der Reisezeiten unter 10 Sekunden. Die maximale, ermittelbare Höchstgeschwindigkeit lag damit bei 72 km/h. Unter der Rahmenbedingung, dass es sich beim untersuchten Bereich um einen innerstädtischen Knotenpunkt handelt, kann diese Filterung als vertretbar angesehen werden. Diese Prozedur wurde für jeden einzelnen Detektor über alle Tage durchgeführt. Die ermittelten Geschwindigkeiten wurden anschließend je Detektor und Tag über den Zeitpunkten der jeweiligen Ersterkennung in einem Diagramm abgetragen (siehe Abbildung 49).

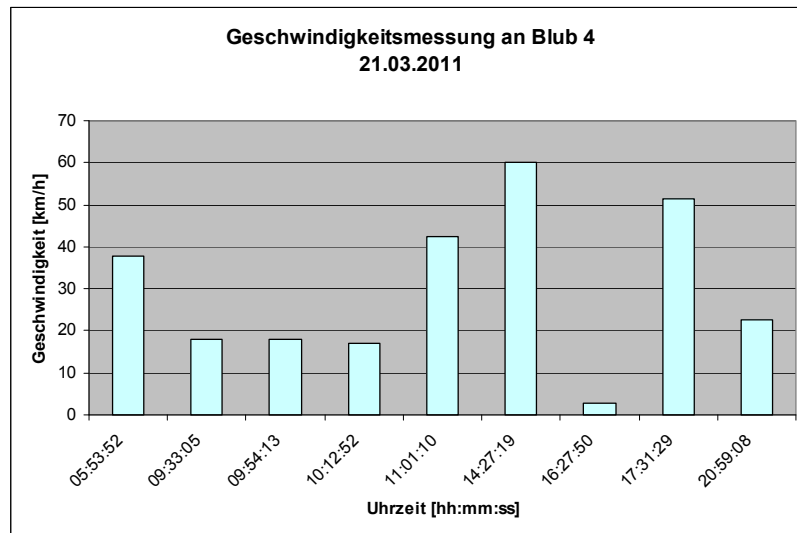


Abbildung 49: Geschwindigkeitsmessung ab Blub 4 für den 21.03.2011

Im Fall der hier abgebildeten Geschwindigkeitsmessung für den Detektor 4 liegt die Annahme nahe, dass die Geschwindigkeiten entsprechend dem tageszeitlichen Verkehrsaufkommen schwanken. Diese Annahme kann jedoch mit den weiteren Ergebnissen für die anderen Detektoren und Messtage nicht bestätigt werden. Werden alle Verläufe zusammengenommen, zeigt sich insgesamt ein inhomogenes Bild. Die ermittelten Geschwindigkeitswerte schwanken sehr stark und lassen daher keine abschließenden Rückschlüsse auf tageszeitliche Zusammenhänge zu (siehe vergleichend die Ergebnisse in Anlage Q).

Als Ursache hierfür wird vor allem die zu geringe Datenmenge gesehen. Aufgrund der verschiedenen Filterstufen bleiben bei dieser Betrachtung nur sehr wenige Datensätze übrig, die tatsächlich in die Untersuchung einfließen. Deren Ergebnisse bilden zwar einerseits die gefahrenen Geschwindigkeiten relativ gut ab, andererseits sind diese statistisch nicht belastbar. So stellen beispielsweise die einzelnen Säulen des oben abgebildeten Diagramms jeweils nur einen Datensatz dar. Das heißt wiederum, dass für den Detektor 4 am 21.03.2011 lediglich neun Fahrzeuge zur Bestimmung der Geschwindigkeit in Betracht kamen. Diese Datenmenge kann demnach nicht als repräsentativ gelten.

Über alle Messtage hinweg konnte eine hohe Anzahl an Datensätzen für den Messstandort Nummer 3 festgestellt werden. Dementsprechend blieben hier auch nach den zuvor genannten Filterungen mehr Datensätze erhalten als bei den anderen Detektorstandorten. Pro Stunde konnten über den gesamten Tag hinweg daher die Geschwindigkeiten für mehrere Datensätze berechnet werden. Aufgrund der Menge an Messdaten bot sich in diesem Fall auch die Betrachtung durchschnittlicher gefahrener Geschwindigkeiten an. Hierfür wurden sowohl die Mittelwerte als auch Mediane aller berechneten Geschwindigkeiten stundenweise gebildet und anschließend über den Stunden des Tages im Diagramm abgetragen. Der Verlauf der Geschwindigkeitsmediane gibt die Verteilung der gefahrenen Geschwindigkeiten besser wieder als die geringen Einzelwerte der anderen De-

tektoren, die zudem nicht für jede Stunde des Tages vorliegen. Vorteil der durch Ausreißer gering beeinflussten Medianberechnung ist jedoch vor allem die statistische Belastbarkeit, die sich aus der Menge der vorhandenen Daten ergibt.

Abbildung 50 enthält exemplarisch die Geschwindigkeitsmediane des 21.03.2011 bezogen auf jede Stunde des Tages. Zugleich wurde hier auch das Verkehrsaufkommen (über alle Detektoren) aufgenommen. Anhand der Gegenüberstellung beider Tagesverläufe können nun auch Zusammenhänge zwischen dem Verkehrsaufkommen und dem Geschwindigkeitsverhalten nachvollzogen werden. Wie zu erwarten war, ist auch bei der Erfassung mit Bluetooth deutlich zu erkennen, dass die Geschwindigkeiten mit steigender Anzahl an Fahrzeugen sinken. In Zeiten mit erhöhtem Verkehrsaufkommen stören sich die Fahrzeuge logischerweise in ihrem freien Fahrverhalten gegenseitig stärker, sodass die Geschwindigkeiten entsprechend angepasst, also gesenkt, werden müssen. Typische Hauptverkehrszeiten (Rush Hour) zeigen demnach geringere Geschwindigkeitsverläufe als Zeiten, zu denen weniger Fahrzeuge unterwegs sind. So entspricht das Absinken der Geschwindigkeiten im Bereich zwischen 6:00 und 10:00 Uhr sowie nachmittags zwischen 15:00 und 17:00 Uhr der Anpassung an die vorliegende Verkehrssituation in den generell durch eine hohe Anzahl an Fahrzeugen gekennzeichneten Zeiten, in denen sich Berufspendler entweder auf dem Weg zur Arbeit bzw. auf dem Rückweg befinden. Durchschnittliche Geschwindigkeiten zwischen 10 und 15 km/h sind hierbei erfahrungsbedingt realistisch aufgrund der speziell an den Knotenpunktzufahrten befindlichen Staubereiche. Insbesondere am im Diagramm dargestellten Detektorstandort Nummer 3 kommt es diesbezüglich häufig aufgrund seiner mittigen Lage zwischen zwei Knotenpunkten zu Rückstausituationen. Dies erklärt gleichzeitig auch die hohe Anzahl an Datensätzen, die für diesen Detektor vorliegen.

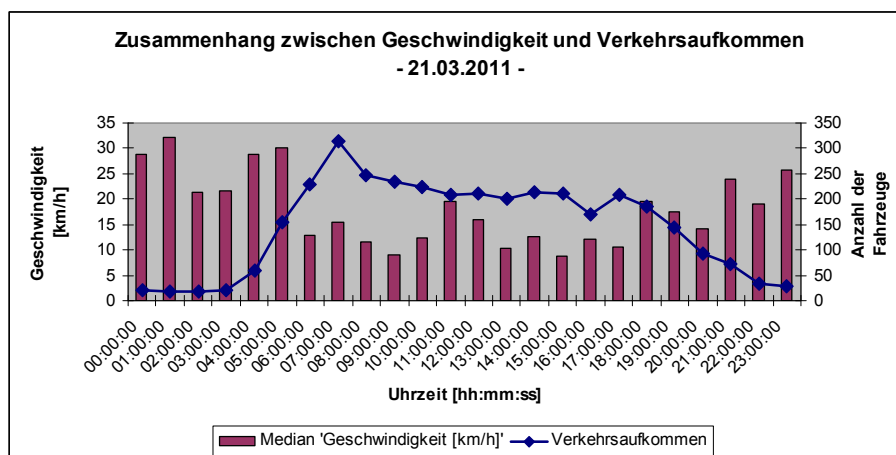


Abbildung 50: Mediane der Geschwindigkeitsmessung an Blub 3 für den 21.03.2011

Neben der Betrachtung der Geschwindigkeiten an einzelnen Detektoren wurden auch die Geschwindigkeiten auf Basis der Wiedererkennung an mehreren Detektoren untersucht. Dies erfolgte für alle vorhandenen Relationen exemplarisch für den 21.03.2011. Als Relationen galten in diesem Zusammenhang wieder die bereits unter Kapitel 6.2.6

angeführten Quelle-Ziel-Relationen (siehe auch Abbildung 36). Um nur die entsprechenden Datensätze, die eine Wiedererkennung an den zu den jeweiligen Relationen gehörenden Detektoren widerspiegeln, in die Untersuchung einzubeziehen, erfolgte hier ebenfalls eine Filterung. In diesem Fall sah die Filterung jedoch die Datensätze vor, in denen zwei- bis dreistellige Werte (direkte Relationen sowie Relationen mit zusätzlicher Zwischenerkennung an Detektor 4) als Sequenzen vorlagen. Aus der ersten Erkennung und der letzten Erkennung wurden für diese Datensätze wiederum die Reisezeiten bestimmt und mit Hilfe der Abstände zwischen den jeweiligen Detektoren die Geschwindigkeiten berechnet. Geschwindigkeiten, die auf Reisezeiten im Stundenbereich sowie Minutenbereich über 5 Minuten basierten, wurden hier ebenfalls herausgefiltert. Aufgrund der relativ großen Datenmengen je Relation erfolgte anschließend die Bestimmung von Mittelwerten und Medianen für jede Stunde des Tages. Das Ergebnis der Medianberechnung für die Relationen von bzw. zum Detektorstandort 3 für den 21.03.2011 kann Abbildung 51 entnommen werden. Jede Kurve entspricht dabei dem Geschwindigkeitsverlauf einer betrachteten Relation über den gesamten Tag. Zum besseren Vergleich der verschiedenen Berechnungsvarianten (Berechnung mit 1 Detektor versus Berechnung über Wiedererkennung an mehreren Detektoren) wurde in Abbildung 51 zudem der Verlauf der Geschwindigkeiten (ebenfalls Mediane), wie er zuvor mit Hilfe der auf einen einzigen Detektor bezogenen Datensätze bestimmt wurde, in das Diagramm einbezogen.

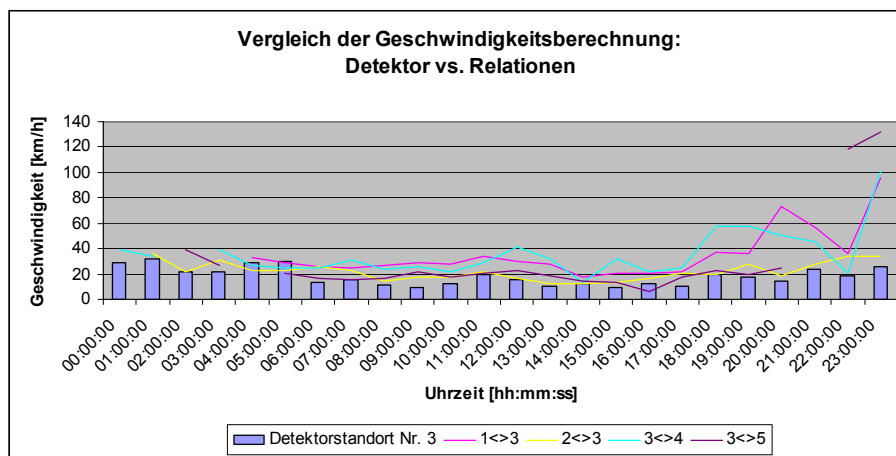


Abbildung 51: Gegenüberstellung der zwei Varianten der Geschwindigkeitsberechnung (Mediane) exemplarisch für den 21.03.2011

Der direkte Vergleich zeigt, dass die Geschwindigkeitsmediane unabhängig von der Berechnungsvariante um den Geschwindigkeitswert von etwa 20 km/h schwanken. Die über einen einzelnen Detektor berechneten Werte liegen dabei geringfügig unter den relationsbasierten Ergebnissen. Insbesondere die Hauptrelation 1<>3 (die auch die Relation 3 <> 4 impliziert) liegt mit Werten zwischen 30 und 40 km/h hier etwas höher als die anderen Relationen. Dies kann jedoch sicherlich auf die Beschleunigung der Hauptrichtung durch eine entsprechende Bevorrechtigung innerhalb der Phasenpläne der am Knotenpunkt befindlichen Lichtsignalanlagen zurückgeführt werden.

Ab etwa 18:00 Uhr gehen die Ergebnisse beider Berechnungen dann immer weiter auseinander. Die relationsbasierten Werte liegen hier für die Relationen 1<>3 sowie 3<>4 nun deutlich höher und bewegen sich im Bereich zwischen 50 und 60 km/h. Etwa gegen 23:00 Uhr steigen die Werte dieser Relationen dann sogar bis auf 100 km/h, für die Relation 3<>5 sogar bis auf 130 km/h. Hierbei muss man jedoch davon ausgehen, dass es sich um Ausreißer sowie geringe, zugrunde liegende Datenmengen handelt, die das Ergebnis verfälschen. Der Verlauf der Geschwindigkeitsmediane bezogen auf einen Detektor bleibt auch in dieser Zeit relativ konstant bei 20 km/h. Unter der Annahme, dass die Fahrzeuge am Detektorstandort 3 tatsächlich mit einer halbwegs konstanten Geschwindigkeit von 30 km/h vorbeifahren, würden die Relationsverläufe eine extreme Beschleunigung im Kreuzungsbereich implizieren, sodass letztendlich eine entsprechend hohe, durchschnittliche Geschwindigkeit zwischen den betrachteten Relationen zustande käme. Eine Erklärung hierfür bietet möglicherweise der Fakt, dass Fahrer oftmals kurz vor der LSA nochmals stark beschleunigen, um die Grünzeit noch nutzen zu können und nicht anhalten zu müssen. Dies scheint insbesondere für die Hauptrichtung (1 <> 3, bzw. auch 3<>4) zuzutreffen, deren Grünzeiten sowieso länger sind, um den Hauptstrom entsprechend schnell abfließen lassen zu können. Auf den Nebenrichtungen dürfte dies jedoch nicht zutreffen. Betrachtet man die Nebenrichtung 2<>3 unterstützt diese die These. Für diese Relation bewegen sich die Geschwindigkeiten auch in den Abendstunden weiterhin im Bereich zwischen 20 und 40 km/h. Die für die Relation 3<>5 gemessene Geschwindigkeit von 130 km/h, erscheint in diesem Zusammenhang allerdings äußerst unrealistisch.

Anhand der bereits zuvor erwähnten Referenzmessungen konnten die mittels Bluetooth erhobenen Geschwindigkeitswerte dem tatsächlichen Geschwindigkeitsniveau gegenübergestellt werden. Dafür wurde wiederum Detektor 3 aufgrund seiner großen Datenbasis gewählt. Die mit Hilfe der Induktionsschleifen ermittelten Geschwindigkeiten wurden bereits auf Stundenwerte aggregiert aus der Datenbank ausgelesen. Da für den Standort Blub 3 keine eigenständigen Referenzmessungen möglich waren, wurde auf die Daten der Induktionsschleifen am Blub-Standort Nummer 4 zurückgegriffen, da diese den Verkehr, der auch Blub 3 passiert, zum Großteil abdecken. Als Vergleichsbasis dienten für beide Erfassungssysteme die auf die einzelnen Stunden des Tages gemittelten Geschwindigkeitswerte (siehe Abbildung 52).

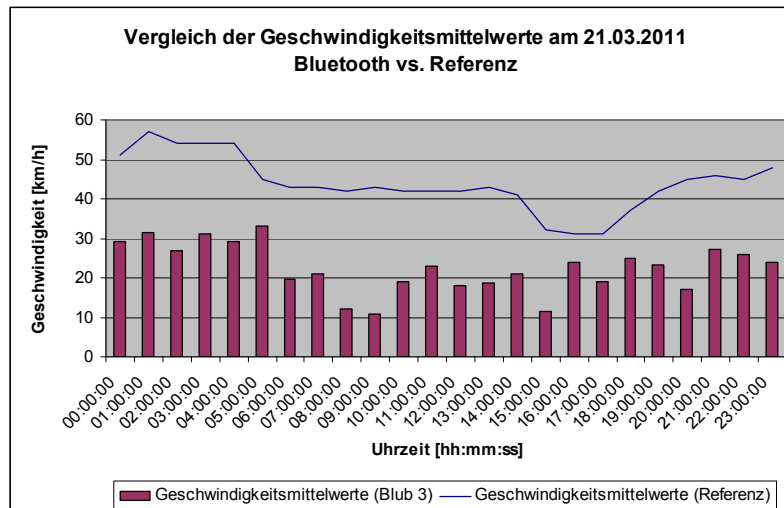


Abbildung 52: Geschwindigkeitsvergleich zwischen Blub 3 und Referenz

Der direkte Vergleich zeigt, dass die mit Bluetooth erhobenen Werte deutlich unter den als reales Abbild des Verkehrs angenommenen Induktionsschleifendaten liegen. Als Ursache hierfür kann einerseits der Geschwindigkeitsfehler gesehen werden, der sich bei der zugrunde gelegten Wegstrecke aufgrund der Unschärfe bei der Positionierung ergibt. Wie in Kapitel 4 erläutert, kann mit einem Geschwindigkeitsfehler von etwa 10 % gerechnet werden. Darüber hinaus entsprechen die Ergebnisse Referenzdaten nicht exakt dem betrachteten Messstandort der Bluetooth-Messungen. Dennoch können an den Bluetooth-Messwerten gewisse Tendenzen festgestellt werden. So ist beispielsweise ein Absinken der gemessenen Geschwindigkeiten ab etwa 06:00 Uhr morgens bis ca. 17:00 Uhr sowohl in den Referenz- als auch in den per Bluetooth erhobenen Daten feststellbar, auch wenn dies bei den Bluetoothdaten tendenziell geringer ausgeprägt ist.

Insgesamt spiegelt die Bestimmung der Geschwindigkeiten über die mit Bluetooth erhobenen Daten ein gewisses tendenzielles Potential wider. Es wurde jedoch deutlich, dass die Belastbarkeit der Ergebnisse deutlich von der Anzahl der zugrunde liegenden Datensätze abhängig ist. Für geringe Datenmenge sind die Ergebnisse als äußerst unrealistisch einzuschätzen. Zudem ist die Repräsentativität nicht gegeben. Bei ausreichender Anzahl an Datensätzen sind die erzielbaren Ergebnisse hingegen in der Lage vorliegende Tendenzen in der tatsächlichen Verkehrssituation abzubilden. Für darauf aufbauende verkehrstechnische Aufgabenbereiche, wie beispielsweise die Beurteilung des Verkehrsgeschehens oder Steuerungs- und Beeinflussungsmaßnahmen, können sie daher durchaus als Orientierung dienen.

6.3.6 Untersuchung der Signalstärke (RSSI)

Der sog. RSSI stellt einen Indikator für die Signalstärke dar. Er ist ein Maß dafür, wie gut ein Bluetooth-Gerät das entsprechende Signal empfängt und kann ebenfalls im Zuge des Inquiry-Vorganges abgefragt werden. Grundsätzlich gilt, dass das empfangene Signal umso stärker ist, je näher der RSSI zum Wert 0 tendiert. Das bedeutet gleichzeitig, dass das

Gerät bei einem Wert von RSSI = 0 die geringste Distanz zum Detektor aufweist. Der Zusammenhang zwischen Signalstärke und Entfernung impliziert die Möglichkeit, über den RSSI den Abstand eines Gerätes zum Detektor genauer bestimmen zu können und so ein Fahrprofil zu erstellen. Dieses Fahrprofil spiegelt die Annäherung an den Detektor, den geringsten Abstand zu ihm sowie die Fortbewegung vorbei am Detektor wider. In Abbildung 53 ist dieser Zusammenhang für eine quasi ideale Umgebung funktional wiedergegeben. Der Kurvenverlauf stellt die Erfassung eines Fahrzeuges bei der Vorüberfahrt an einem Detektor dar. [AHME07]

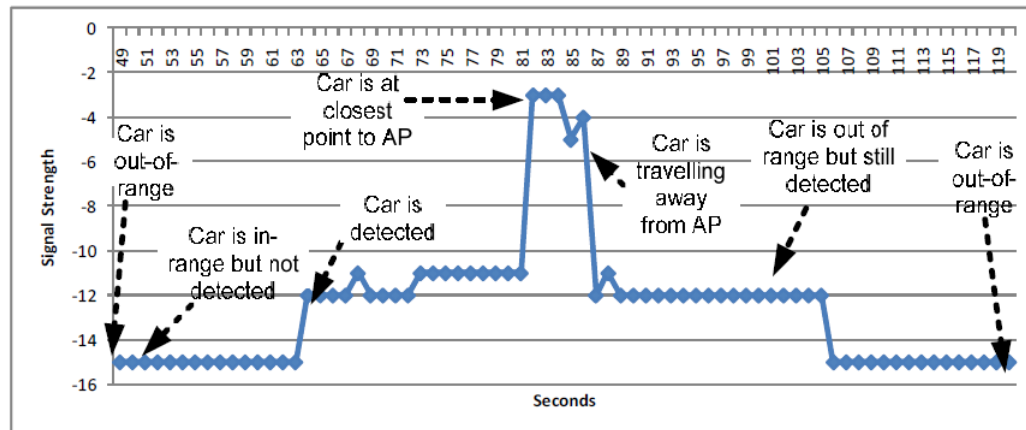


Abbildung 53: Signalstärkeverlauf eines sich bewegenden Fahrzeuges innerhalb einer nahezu idealen Umgebung [AHME07]

Bei der Abbildung des Verlaufs des RSSI-Wertes bezogen auf einen einzigen Detektor kann zwar über den Anstieg der Kurve sowie den Zeitstempel festgestellt werden, wann sich das entsprechende Fahrzeug in etwa in der Nähe des Detektors aufgehalten hat. Aufgrund des großen Detektionsradius der Bluetooth-Detektoren und der damit verbundenen gleichzeitigen Erfassung beider Fahrtrichtungen ist jedoch kein Rückschluss auf die Quelle-Ziel-Relation möglich. Für eine eindeutige Identifikation der Bewegungsrichtung ist daher die Detektion an mehreren Detektoren notwendig. Über die zugehörigen Zeitstempel kann dann die Reihenfolge der abgefahrenen Detektoren und so die Fahrtrichtung ermittelt werden.

Die Idee der Verwendung des RSSI zur Abstandsbestimmung bzw. Positioneingrenzung besteht darin, abstandsbezogene Kenngrößen wie die Reisezeit und -geschwindigkeit auf Basis genauerer Positionsangaben präziser berechnen zu können. Existierende Untersuchungen bescheinigen dem RSSI selbst jedoch momentan eine zu geringe Genauigkeit, um tatsächlich Verbesserungen hinsichtlich der Positionsangaben von Fahrzeugen innerhalb des Erfassungsbereichs zu erreichen (siehe hierzu auch Abschnitt 4.2.3, Abschnitt außerstädtische Kenngrößen, Punkt 2: Geschwindigkeit).

Die im Zuge dieser Arbeit durchgeführte Untersuchung des RSSI bildet den Abschluss der Untersuchungsreihe. Die Untersuchung erfolgte exemplarisch für einen Teil der Datensätze des 24.03.2011. Als Ausgangspunkt diente im Gegensatz zu den anderen Untersu-

chungen nicht die reduzierte Variante der sortierten Datensätze, sondern deren Vorstufe. In dieser sind die Daten lediglich nach MAC-Adresse geordnet, mehrmalige Erfassungen sind dabei noch nicht zusammengefasst (siehe Abschnitt 6.2.2). Der Vorteil der Nutzung dieser Vorstufe besteht darin, dass die Zuordnung der einzelnen RSSI-Werte zum jeweiligen Detektor erhalten ist, wohingegen in der reduzierten Liste der Zusammenhang zwischen RSSI und Detektor verschwimmt. Mit Hilfe des Zeitstempels kann aufbauend auf den nicht reduzierten Datensätzen der RSSI-Verlauf getrennt nach Detektoren für jede einzelne MAC-Adresse über der Zeit abgetragen werden (siehe Abbildung 54).

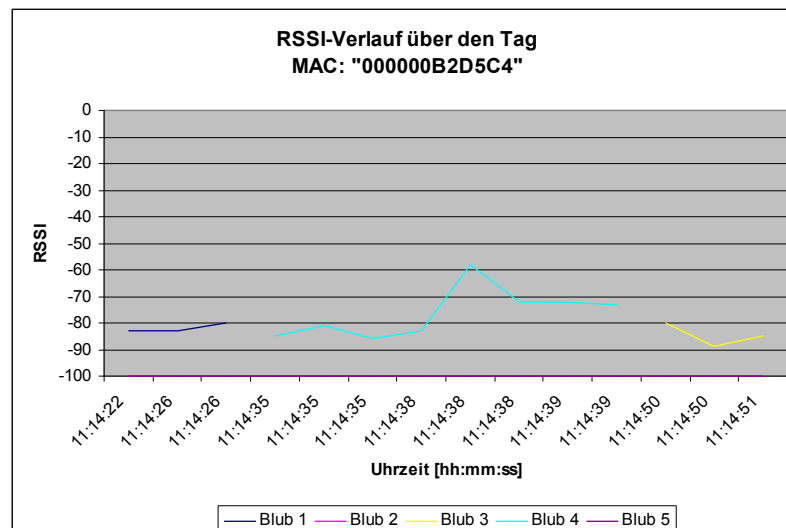


Abbildung 54: RSSI-Verläufe der Mac-Adresse „00:00:00:B2:D5:C4“ für den 24.03.2011

Das exemplarisch ausgewählte Diagramm spiegelt das Bewegungsprofil des erfassten Fahrzeuges mit der Mac-Adresse „00:00:00:B2:D5:C4“ wider. Die Ableitung des tatsächlichen Fahrtverlaufs, d.h. der Rückschluss aus welcher Richtung das erfasste Fahrzeug kam und in welche Richtung es sich weiterbewegte, kann wie bereits angesprochen nur mit Hilfe einer mehrmaligen Erfassung an verschiedenen Detektoren realisiert werden. Im Diagramm kann daher gut erkannt werden, dass sich das Fahrzeug laut zeitlichem Verlauf aus Richtung des Detektors Nummer 1 (Blub 1) in Richtung des Detektors Nummer 3 (Blub 3) bewegte. Auf diesem Weg wurde es zusätzlich am Detektor Nummer 4 (Blub 4), der sich auf der Kreuzungsmitte befindet, erfasst. Insgesamt benötigte das erfasste Fahrzeug 30 Sekunden, um den Knotenpunkt zu passieren.

Die Betrachtung der einzelnen RSSI-Verläufe der Detektoren 1 und 3 zeigt, dass diese bruchstückhaft erscheinen und kein ausgeprägtes Profil aufweisen. Höhen, die eine Annäherung an die jeweiligen Detektoren darstellen sowie Tiefen, die einen höheren Abstand verdeutlichen, können nicht ausgemacht werden. Der Verlauf der RSSI-Werte bezogen auf den zentral gelegenen Detektor 4 zeigt hingegen ein prägnanteres Profil. Vom Zeitpunkt der ersten Erfassung steigen die RSSI-Werte für die folgenden Zeitstempel kontinuierlich an, um nach dem Peak um 11:14:38 Uhr wieder abzusinken. Es liegt die Annahme nahe, dass die Ursache für die gute Abbildung des RSSI-Verlaufs an Detektor 4 in

der längeren Aufenthaltszeit im Bereich des Erfassungsradius dieses Detektors liegt. Vergleicht man jedoch die Erkennungszeiträume durch die jeweiligen Detektoren, fällt auf, dass sich das Fahrzeug laut den Zeitstempeln der einzelnen Erfassungen ebenso lange im Bereich des Detektors 1 wie im Bereich von Detektor 4 aufgehalten hat. Lediglich die Häufigkeit der Erfassung kann als Indiz für die bessere Abbildung des Verlaufs gesehen werden. Bei der Untersuchung weiterer MAC-Adressen konnte diesbezüglich ebenfalls tendenziell eine Erhöhung der Eindeutigkeit des Verlaufs der RSSI-Kurve festgestellt werden, umso häufiger das Fahrzeug am Detektor erkannt wurde (siehe dazu weitere Beispiele in Anlage R).

Voraussetzung für die Identifizierbarkeit der Bewegungsprofile ist neben der Detektion an mehreren Detektoren auch die zuvor angesprochene Nutzung der nicht reduzierten Datensatz-Liste. Diese ermöglicht die eindeutige Zuordnung eines RSSI-Wertes zu einem Detektor. Bei den für die vorherigen Untersuchungen zugrunde gelegten reduzierten Datensätzen wurde diese Zuordnung aufgelöst, indem die abgefahrenen Detektor-Kennzahlen als Sequenz zusammengefasst wurden. Diese Herangehensweise reduziert zwar einerseits die Anzahl an Datensätzen und macht die Datenmengen damit insgesamt handhabbarer, jedoch geht damit andererseits ein Informationsverlust einher. Eine Rückverfolgung, welcher Teil der jeweiligen Sequenz tatsächlich einen eigenständigen Fahrtverlauf darstellt, ist damit nicht mehr möglich. Sequenzen erscheinen aufgrund dessen teilweise unrealistisch. Zusätzlich liegen für diese Sequenzen Reisezeiten vor, die sich über mehrere Stunden erstrecken, da die gesamte Sequenz als ein zusammenhängendes Bewegungsprofil aufgefasst und dementsprechend die Reisezeit von Anfangs- bis Endzeitpunkt der Sequenz bestimmt wird. Die für solche Sequenzen berechneten Reisezeiten werden dann aufgrund ihrer Unstimmigkeit hinsichtlich der tatsächlichen Verkehrssituation herausgefiltert (siehe Abschnitt 6.3.4), obwohl die Sequenz in ihren einzelnen Quelle-Ziel-Relationen und den dazugehörigen Reisezeiten durchaus korrekte Ergebnisse liefert bzw. liefern könnte. Die Vorgehensweise zur Untersuchung des RSSI bietet diesbezüglich entscheidende Vorteile. Mit Hilfe der RSSI-Betrachtung können eigenständige Fahrtverläufe als Segmente der Sequenzen eindeutig differenziert werden.

Dies zeigt beispielsweise der Verlauf der RSSI-Kurve für die MAC-Adresse „00:00:00:B3:4F:BD“ am 24.03.2011 ab ca. 12:48 Uhr (siehe Abbildung 55). Die entsprechende MAC-Adresse wurde zunächst am Detektor 2 erkannt, dann zwischenzeitlich an Detektor 4 erneut detektiert und schließlich von Detektor 3 um etwa 12:50 Uhr erfasst. Circa 40 Minuten später konnte dieselbe MAC-Adresse wieder, jedoch diesmal aus Richtung des Detektors 3 kommend und zum Detektor 2 über Detektor 4 fahrend, erkannt werden. Das heißt, dass das erfasste Fahrzeug nachdem es sein Ziel erreicht hatte und dort eine gewisse Zeitspanne überbrückt hat, wieder umgekehrt ist und denselben Weg zurückgefahren ist. Innerhalb der Abbildung 55 wurden die entsprechenden Kurvenverläufe von Hin- und Rückfahrt zur besseren Erkennbarkeit gekennzeichnet.

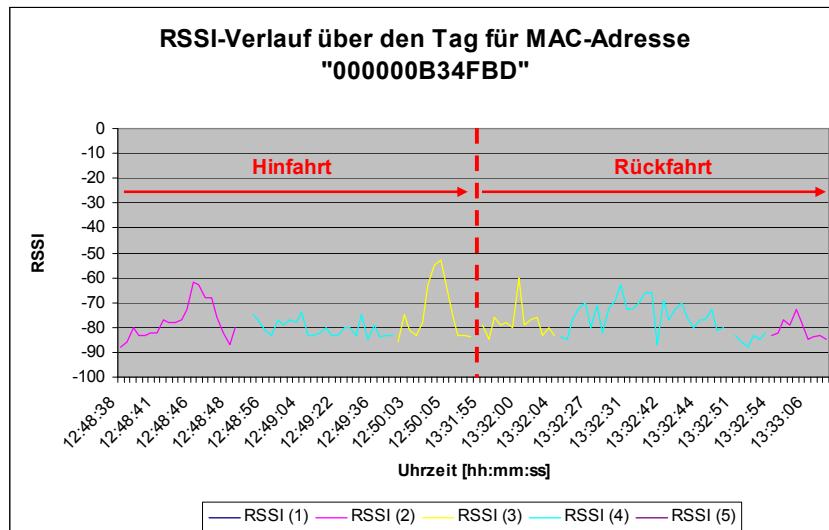


Abbildung 55: RSSI-Verlauf der MAC-Adresse „00:00:00:B3:4F:BD“ am 24.03.2011

Insgesamt konnten während der Untersuchung der RSSI-Verläufe viele Bewegungsprofile ausgemacht werden, in denen die jeweiligen Fahrzeuge zunächst von der Quelle zum Ziel fuhren, um dann etwas später den gleichen Weg, jedoch in umgekehrter Reihenfolge wieder zurückzufahren. Teilweise handelte sich dabei sogar um mehrere Hin- und Rückfahrten. Über den ganzen Tag verteilt konnten so für einzelne MAC-Adressen komplexe Bewegungsmuster aufgezeichnet werden, wie z.B. der Kurvenverlauf der RSSI-Werte für die MAC-Adresse „00:00:00:EE:5E:B6“ zeigt (siehe Abbildung 56). So bewegt sich die erfasste MAC-Adresse gegen 05:00 Uhr morgens aus Richtung des Detektors 2 kommend, über Detektor 4 in Richtung des Detektors Nummer 3 und benötigt hierfür etwa 1 Minute. Kurz nach halb drei, also fast 10 Stunden später, wird diese MAC-Adresse wieder erfasst und befindet sich diesmal offenbar auf dem Rückweg. Es ist eindeutig eine Rückwärtsbewegung von Detektor 3 über 4 zurück zu 2 zu erkennen. Bei dieser Fahrt werden 1,5 Minuten zur Überwindung der Kreuzung benötigt. Gegen 16:45 Uhr begibt sich dieselbe MAC-Adresse schließlich nochmals auf den Weg und bewegt sich in diesem Fall von Detektor 2 über Blub 4 nach 5 mit einer Reisezeit von etwa 2 Minuten. Um 17:30 Uhr wird dieselbe MAC-Adresse erneut auf dem Rückweg, von Detektor Nummer 5 über 4 nach 2 erfasst und ist knapp über 1 Minute unterwegs. Über die zu den entsprechenden Zeiträumen zugehörigen RSSI-Verläufe können die Bewegungsprofile der verschiedenen Fahrten eindeutig als Einzelsegmente charakterisiert werden.

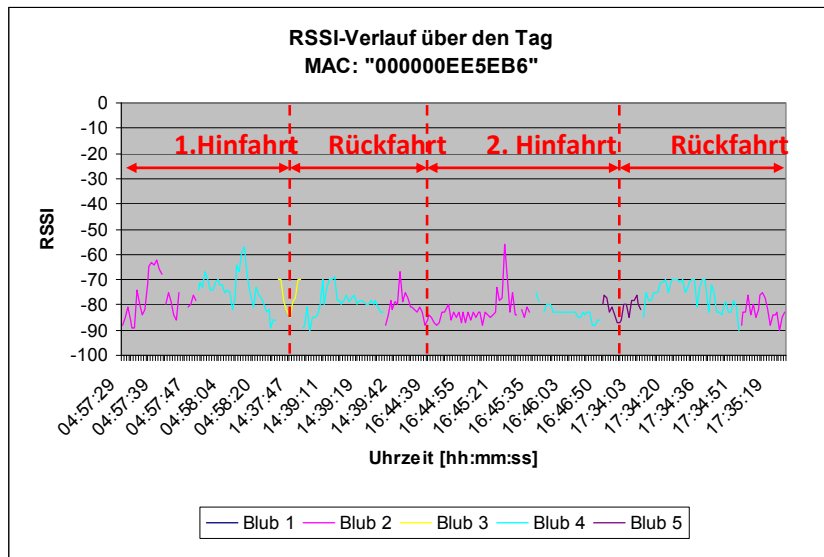


Abbildung 56: RSSI-Verlauf der MAC-Adresse „00:00:00:EE:5E:B6“ am 24.03.2011

Neben der Erkennung von Bewegungsprofilen ermöglicht die Darstellung des RSSI-Verlaufs über der Zeit auch die einfache und schnelle Schätzung von Reisezeiten und Geschwindigkeiten. Unter der Annahme, dass auch hier gilt, dass der Zeitpunkt der Erkennung quasi mit dem Eintritt in den Erfassungsbereich des Detektors bzw. der Austritt mit dem letzten Erfassungszeitpunkt gleichzusetzen ist, kann anhand des Zeitbedarfs die Reisezeit pro Detektor bzw. über das gesamte Bewegungsprofil abgelesen werden. Unter Annahme eines Detektionsdurchmessers von 200 Metern kann anschließend auch die als konstant angenommene Geschwindigkeit, mit der das erfasste Fahrzeug an den jeweiligen Detektoren vorbeigefahren ist, berechnet werden. Beide Werte entsprechen jedoch auch in diesem Fall nur Schätzungen, da auch hierbei keine exakte Position des Fahrzeuges zugrunde gelegt werden kann. Der RSSI selbst ist dabei nur bedingt zur Genauigkeitssteigerung geeignet. Er dient vielmehr als Anhaltspunkt für die Detektionsgüte. Je länger und öfter das Fahrzeug an einem Detektor erkannt wurde, umso charakteristischer ist der Verlauf der RSSI-Kurve zumeist ausgeprägt. Eine RSSI-Kurve mit gut erkennbarem, konstantem Anstieg, deutlichem Peak und einem ebenso ausgebildeten Abfall der Kurve bildet ein eindeutiges Detektionsprofil ab, das die Durchfahrt durch den Erfassungsbereich besser widerspiegelt als einzelne bruchstückhafte RSSI-Verläufe. Für solche langen RSSI-Verläufe kann daher mit einer gewissen Sicherheit davon ausgegangen werden, dass deren Zeitpunkte der ersten und der letzten Erkennung nahezu identisch zu den Eintritts- bzw. Austrittspositionen in Bezug auf den Erfassungsbereich sind. Dementsprechend ist auch die darauf basierende Berechnung von Reisezeiten und -geschwindigkeiten genauer.

Im Zusammenhang mit der Nutzung des RSSI erscheint es sinnvoll, datenschutzrechtliche Bedenken zu berücksichtigen. Aufgrund der Möglichkeit, ganze Bewegungsabläufe über den Tag zu rekonstruieren, besteht ein datenschutzrechtliches Risiko, das bei der Aufnahme von MAC-Adresse zu Forschungs- und Steuerungszwecken nicht außen vor gelas-

sen werden kann. Obwohl die MAC-Adresse im Grunde keine personalisierte Kenngröße darstellt, kann unter gewissen Umständen dennoch ein Rückschluss auf den jeweiligen Nutzer möglich sein. Es ist daher notwendig, die Möglichkeit der Rückverfolgung beispielsweise über Verschlüsselungsalgorithmen auszuschließen und die Datenhaltung entsprechend sicher zu gestalten.

Zusammengefasst lässt sich feststellen, dass der RSSI zur detaillierten Untersuchung einzelner Bewegungsprofile gut geeignet ist. Die RSSI-Verläufe implizieren einen hohen Informationsgehalt. So können aus den Verläufen leicht zusätzliche Informationen wie beispielsweise Reisezeiten in Bezug auf das Passieren eines Detektors oder auch hinsichtlich des gesamten Fahrtverlaufs geschätzt werden. Anhand der RSSI-Verläufe kann das Abstandsverhalten eines detektierten Fahrzeugs zum Detektor abgeleitet werden, jedoch trifft auch hier wieder eine gewisse Unschärfe bezüglich des Ein- und Austritts des Fahrzeugs aus dem Erfassungsbereich zu. Um Aussagen zur Fahrtrichtung treffen zu können, ist die Detektion der entsprechenden MAC-Adresse an mehreren Detektorstandorten zwingend notwendig. Der RSSI kann insgesamt somit als gewinnbringende Zusatzinformation gesehen werden, die insbesondere hinsichtlich der Bewegungsprofile von Nutzen ist. Datenschutzrechtliche Bedenken sollten bei der Untersuchung unbedingt beachtet werden. Eine Verschlüsselung der entsprechenden MAC-Adressen bietet sich hierbei an.

6.3.7 Zwischenfazit

Die gezielte Untersuchung spezieller Kenngrößen offenbart insgesamt ein hohes Potential der Bluetooth-Detektoren für den verkehrstechnischen Einsatz.

Es konnte gezeigt werden, dass die Bluetooth-Technologie in der Lage ist, Tendenzen des Verkehrsaufkommens wiederzugeben und damit die vorliegende Verkehrssituation realistisch abzubilden. Mit Erfassungsraten im Bereich von 30 % des Gesamtverkehrsaufkommens stellt die erzielbare Datenmenge ein belastbares Gerüst für darauf aufbauende Beurteilungen dar. Wiedererkennungsraten von ca. 50 % der Erfassungsraten, d.h. etwa 15 % des Gesamtverkehrsaufkommens, erlauben zudem aussagekräftige Berechnungen von Verkehrskenngrößen, wie Reisezeiten und Geschwindigkeiten. Die Fähigkeit zur eindeutigen Wiedererkennung von Fahrzeugen ermöglicht darüber hinaus die Aufstellung von Quelle-Ziel-Relationen. Die Untersuchung der Quelle-Ziel-Relationen im Hinblick auf die prozentuale Verteilung der Routenströme an der betrachteten Kreuzung konnte jedoch in dieser Arbeit aufgrund unzureichender Referenzdaten nur ansatzweise analysiert werden, sodass belastbare Ergebnisse diesbezüglich noch ausstehen.

Die Berechnung der Reisezeiten und -geschwindigkeiten lieferte trotz vorliegender Unschärfen hinsichtlich der Genauigkeit bei der Positionierung dagegen zufriedenstellende Ergebnisse. Die Anwendung der Bluetooth-Detektoren kann daher in diesem Kontext als empfehlenswert eingestuft werden. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass die zugrunde liegende Filterung verfälschender Datensätze eine starke Reduktion des nutzbaren Da-

tenmaterials verursachte. Potential wird hier vorallem in der Aufbereitung der Daten gesehen.

Für temporäre Messungen, bei denen mit möglichst wenig Aufwand, kostengünstig und schnell verkehrstechnische Daten erhoben werden sollen, kann die Eignung der Bluetooth-Detektion respektive die auf ihren Daten basierende Berechnung von Reisezeiten und Geschwindigkeiten bestätigt werden. Mögliche Anwendungsfelder liegen insbesondere bei detektionstechnisch gering ausgestatteten Strecken, für die zeitweilige Lastspitzen erfasst werden sollen. Gemeint sind hierbei beispielsweise Umleitungs- oder Umgehungsstraßen, die bei Störungen auf den eigentlichen Hauptverkehrsstrecken zum Einsatz kommen und deren Ausstattung mit stationären Detektoren zu kostenintensiv wäre. Zeitweise Messungen mit Hilfe eines einfach zu installierenden Detektionssystems, wie die Bluetooth-Detektoren, können hier wertvolle Informationen über die temporär geänderte Verkehrslage erbringen und ermöglichen eine Beurteilung ggf. notwendiger, zusätzlicher Maßnahmen.

Die abschließende Untersuchung des Signalstärke-Indikators, des sog. RSSI, offenbarte darüber hinaus, die besondere Fähigkeit des Bluetooth-Detektionssystems zur netzweiten Erfassung von Bewegungsprofilen. Diese Fähigkeit impliziert gleichzeitig jedoch ein hohes datenschutzrechtliches Risiko aufgrund der als eindeutiges Identifikationsmerkmal verwendeten MAC-Adresse der bluetoothfähigen Geräte. Anhand der MAC-Adresse ist theoretisch eine Personalisierung der erhobenen Datensätze realisierbar. Die Möglichkeit zur netzweiten Erhebung der Verteilung von Routenströmen anhand von Stichproben birgt jedoch insbesondere für verkehrsplanerische Zwecke ein erhebliches Potential im Hinblick auf die Beurteilung der Quelle-Ziel-Beziehungen.

6.4 Analyse potentieller Fehlerquellen

Eine kritische Auseinandersetzung mit den Ergebnissen und der Herangehensweise an die zuvor beschriebene Untersuchung soll die empirische Untersuchung im Folgenden abrunden und als Anhaltspunkt für weiterführende Untersuchungen gelten. Besondere Auffälligkeiten und Verbesserungsansätze, die während der Datenauswertung aufgefallen sind, werden an dieser Stelle zusammengefasst.

Als erste potentielle Fehlerquelle konnte die zeitliche Synchronisierung der Detektoren identifiziert werden. Vor Inbetriebnahme wurden alle Detektoren zunächst zeitlich synchronisiert. Diese Synchronisation soll die Vergleichbarkeit der den Datensätzen zugeordneten Zeitstempel sicherstellen. Da jedoch bei den internen Uhren der Geräte ein leichter Versatz hinsichtlich der Geschwindigkeiten mit der die Uhr arbeitet möglich ist, kann es bei voneinander unabhängiger Funktion der Detektoren über mehrere Tage hinweg zum Zeitversatz zwischen den Detektoren kommen. Für die auf den Zeitstempeln basierende Berechnung der Reisezeit impliziert dies einen systematischen Fehler, der Ungenauigkeiten bis in den Minutenbereich hervorrufen kann, je nachdem wie lange die Messungen erfolgten. Zur Lösung des Problems empfiehlt es sich daher, direkt nach der

Messung eine Überprüfung der internen Zeiten durchzuführen. Indem die interne Uhr nach den Messungen mit der Uhr, die der Synchronisierung vor der Messung diente, verglichen wird, kann der entstandene Zeitfehler quantifiziert und entsprechend bei den weiterführenden Betrachtungen berücksichtigt werden.

Eine weitere potentielle Fehlerquelle konnte für die Datenaufbereitung erkannt werden. Im Hinblick auf die Datenauswertung besitzt die Datenaufbereitung bereits einen entscheidenden Anteil an den erzielbaren Ergebnissen. Die in dieser Arbeit zunächst durchgeführte Reduzierung der Datensätze impliziert zwar einerseits eine höhere Übersichtlichkeit und bessere Handhabung der vorliegenden Datenmengen. Andererseits zeigte sich bei der abschließenden Betrachtung der RSSI-Verläufe, dass die in Kapitel 6.2.2 vorgestellte Reduzierung der Mehrfacherkennungen einzelner MAC-Adressen auf einen einzigen Datensatz den Informationsgehalt des Datenmaterials mindert. Dabei geht die Zuordnung einzelner Erfassungszeitpunkte zu den jeweiligen Detektoren verloren. Die Reihenfolge der Detektoren, die die jeweilige MAC-Adresse erfasst haben, wird zugunsten des gesamten Fahrtverlaufs in einer Sequenz aufgelöst, deren Einzelwerte zwar in ihrer Anordnung der Reihenfolge entsprechen, jedoch keinen eigenständigen Zeitbezug mehr aufweisen. Die entstandenen Sequenzen bilden somit die Trajektorien, also den Fahrtverlauf der erfassten Fahrzeuge ab. Der fehlende Zeitbezug zu den Einzelwerten der Sequenzen verhindert allerdings die Identifikation separater Fahrten. Die Sequenz wird stattdessen als eine zusammenhängende Fahrt interpretiert. Eine Rückverfolgung, welcher Teil der jeweiligen Sequenz tatsächlich einen eigenständigen Fahrtverlauf darstellt, ist damit nicht mehr möglich. Zwischenzeitliche Rückfahrten sowie mehrmaliges Befahren eines Streckenabschnittes aufgrund anderweitiger Besorgungen können so weder dargestellt noch in der Auswertung erkannt werden.

Darüber hinaus erscheinen die berechneten Reisezeiten, die sich teils über mehrere Stunden erstrecken, da die Reisezeit von Anfangs- bis Endzeitpunkt der Sequenz bestimmt wird, aufgrund dessen teilweise unrealistisch. Die Unstimmigkeit hinsichtlich der tatsächlichen Verkehrssituation mündete schließlich im Ausschluss dieser Datensätze, obwohl die entsprechenden Sequenzen in ihren einzelnen Quelle-Ziel-Relationen und den dazugehörigen Reisezeiten durchaus korrekte Ergebnisse liefern bzw. liefern könnten. Eine große Datenmenge wurde somit von der Untersuchung ausgeschlossen. Um eigenständige Fahrtverläufe als Segmente der Sequenzen eindeutig differenzieren zu können und die Menge ungenutzter Daten möglichst gering zu halten, sollte daher in folgenden Untersuchungen der Zusammenhang zwischen dem detektierenden Gerät und dem einzelnen Zeitstempel einer Erfassung bestehen bleiben, auch wenn dies im Umkehrschluss die Handhabung einer wesentlich höheren Datenmenge bedeutet.

Ein weiteres Fehlerpotential kann ferner in der Berechnung von Reisezeiten und Geschwindigkeiten auf Basis angenommener Bezugspositionen gesehen werden. Die Annahme des Gleichsetzens von erstem und letztem Zeitstempel mit den Zeitpunkten des Ein- bzw. Austritts aus dem Erfassungsbereich des Detektors impliziert eine hohe Un-

schärfe, die sich wiederum in einer Ungenauigkeit der berechneten Kenngrößen niederschlägt. Innerhalb einer anderen Untersuchung [AHME07], die sich mit dem Zusammenhang zwischen dem RSSI und dem Abstandsverhalten zum Detektor beschäftigte, konnte diese Ungenauigkeit für die Geschwindigkeit auf etwa 10 % beziffert werden. Die Betrachtung des RSSI konnte innerhalb dieser Arbeit keine genaueren Erkenntnisse hinsichtlich der tatsächlichen Position bei der Erfassung liefern. Dies war jedoch insbesondere auch dem Fakt geschuldet, dass die Zuordnung zwischen Detektor, Zeitstempel und RSSI aufgrund der zugrunde gelegten, reduzierten Datensätze fehlte. Eine Möglichkeit, den RSSI in dieser Hinsicht besser einbinden zu können, besteht auch hier in der Verwendung nicht reduzierter Datensätze, sodass beispielsweise bei der Berechnung von Reisezeit und Geschwindigkeit zwischen zwei Detektoren die Zeitstempel genutzt werden, bei denen das erfasste Fahrzeug die geringste Distanz entsprechend des RSSI aufweist. Die Position kann dann quasi mit dem Standort des Detektors gleichgesetzt werden.

Neben der genauen Position eines Fahrzeuges innerhalb des Erfassungsradius spielt auch der Richtungsbezug bei der Berechnung von Reisezeiten und Geschwindigkeiten eine entscheidende Rolle. Meist unterscheiden sich die Richtungen tageszeitenbezogen in ihren Verkehrsstärken. Eine Trennung bei der Bestimmung der Reisezeiten und Geschwindigkeiten erfolgte im Rahmen dieser Arbeit nicht, erscheint jedoch für weitere Untersuchungen zwingend notwendig. Die innerhalb dieser Untersuchungen berechneten Reisezeiten stellen so lediglich stundenweise gemittelte Reisezeiten über den gesamten betrachteten Knotenpunkt hinweg dar. Eine differenzierte Betrachtung der Reisezeiten auf den verschiedenen Routen mit Richtungsunterscheidung ist so nicht möglich.

Als weitere Fehlerquelle kann die fehlende Filterung anderer Verkehrsteilnehmer gesehen werden. Zwar wurde für die empirische Untersuchung bewusst ein Knotenpunkt mit geringer Beeinflussung durch Fahrradfahrer, Fußgänger sowie ÖPNV gewählt, jedoch kann deren Vorhandensein nicht vollständig ausgeschlossen werden.

6.5 Fazit

Innerhalb der empirischen Untersuchungen wurden sowohl generelle Eigenschaften der neu eingesetzten Bluetooth-Technologie betrachtet, als auch die Erfassung spezieller verkehrstechnischer Kenngrößen nachvollzogen.

Im Hinblick auf die generellen, technologischen Eigenschaften von Bluetooth wurden Erkennungsraten, Wiedererkennungsraten, Reichweiten, benötigte Inquiry-Zeiten sowie Ansprechgeschwindigkeiten eingehend untersucht. Es konnten bei Verwendung von Bluetooth-Adaptern der Klasse Erfassungsmengen im Bereich von etwa 6 % des Gesamtverkehrsaufkommens festgestellt werden, wobei nochmals die Hälfte dieser erfassten Fahrzeuge an einer anderen Station wiedererkannt werden konnten. Darüber hinaus konnte ein Zusammenhang zwischen den gefahrenen Geschwindigkeiten und der erfassten Verkehrsmenge festgestellt werden. Je langsamer sich die Fahrzeuge fortbewegen,

desto höher ist die Wahrscheinlichkeit einer Erfassung. Mit Hilfe der Untersuchung der generellen Charakteristiken des neu eingesetzten Erfassungssystems konnte ein Eindruck von der Funktionsweise der Bluetooth-Technologie als Verkehrsdetektor gewonnen werden, auf dessen Basis schließlich die eingehende Untersuchung der verkehrstechnischen Kenngrößen erfolgte.

Die Untersuchung spezieller Verkehrskenngrößen beschäftigte sich anschließend mit der Erfassbarkeit von spezifischen Messgrößen des Verkehrsablaufs, die der Beurteilung des Verkehrsstroms zugrunde liegen. Als relevanten Größen des Verkehrsaufkommens wurden hierbei wiederum die Erfassungsraten und Wiedererkennungsraten sowie die Verteilung der Verkehrsströme im Hinblick auf erkennbare Quelle-Ziel-Relationen analysiert. Darüber hinaus erfolgte eine Betrachtung der Berechenbarkeit von Reisezeiten und Reisegeschwindigkeiten anhand der erhobenen Datensätze sowie eine abschließende Untersuchung des Nutzwertes des Signalstärke-Indikators (RSSI). Die Ergebnisse dieser zweiten empirischen Untersuchungsreihe offenbarten eine deutliche Verbesserung hinsichtlich der Erkennungs- und Wiedererkennungsraten. Mit 30 % bzw. 15 % lagen diese zwar erheblich über den ersten Messungen, jedoch blieb deren Verhältnis zueinander gleich. Die Verbesserung der Ergebnisse wurde in diesem Fall auf die Verwendung von Bluetooth-Adaptoren der Klasse 1 zurückgeführt. Desweiteren zeigten Reisezeit- und -geschwindigkeitsberechnungen trotz einer gewissen Ungenauigkeit, die auf die Unschärfe bei der Positionsbestimmung der erfassten Fahrzeuge zurückzuführen ist, zufriedenstellende Ergebnisse. Es kann somit konstatiert werden, dass die Ermittlung von Reisezeiten und Geschwindigkeiten auf Basis der mit Bluetooth erhobenen Daten durchaus Potential besitzt. Dieses Potential bezieht sich bezüglich des Praxiseinsatzes insbesondere auf Streckenabschnitte, die bisher keine technische Ausstattung mit Erfassungssystemen aufweisen können und deren Ausrüstung in keinem vernünftigen Nutzen-Kosten-Verhältnis stehen würde. Anwendungsfelder werden diesbezüglich vor allem im Bereich der kurzfristigen Erhebungen gesehen. Zur schnellen Sammlung von Daten, die auf Erkenntnisse hinsichtlich verkehrlicher Tendenzen abzielen oder auch beim temporären Einsatz der Bluetooth-Detektoren an Umgehungs- oder Umleitungsstraßen zur zeitweiligen Auslastungsmessung sind Bluetooth-Detektoren bestens geeignet. Als relevante Voraussetzung für die Eignung der Bluetooth-Detektoren konnte der Durchfluss einer Straße identifiziert werden. Beim Einsatz von Bluetooth-Detektoren sollte eine gewisse vorhandene Mindestverkehrsmenge nicht unterschritten werden. Die Ursache hierfür liegt darin begründet, dass nur ein Teil der Fahrzeuge tatsächlich erkannt werden kann. Sinkt die Gesamtverkehrsmenge, so sinkt auch die Wahrscheinlichkeit der Erfassung von Fahrzeugen, die mit bluetoothfähigen Geräten ausgestattet sind. Ist diese Voraussetzung jedoch erfüllt, liefert die Verkehrserfassung mittels Bluetooth hohe Datenmengen mit im Vergleich zu gängigen Detektionsmethoden belastbaren Ergebnissen, die durchaus in der Lage sind Tendenzen des gemessenen Verkehrsflusses realitätsnah abzubilden. Die einfache und schnelle Installierbarkeit, genauso wie die Größe und Handhabung bergen zu-

dem eine hohe Mobilität und Flexibilität hinsichtlich des Einsatzes dieses Erfassungssystems.

Insgesamt konnte festgestellt werden, dass die Verkehrserfassung mittels Bluetooth ein hohes Potential im Hinblick auf den Einsatz innerhalb des Verkehrsmanagements besitzt. Die Fähigkeit zur eindeutigen Wiedererkennung von Fahrzeugen ermöglicht die Aufstellung von Quelle-Ziel-Relationen anhand derer die prozentuale Verteilung der Routenströme nachvollzogen werden kann. Die darauf aufbauende Eignung zur Erstellung von netzweiten Bewegungsprofilen birgt zwar ein hohes datenschutzrechtliches Risiko, eröffnet jedoch gleichzeitig der Beurteilung von Quelle-Ziel-Beziehungen zu verkehrsplanerischen Zwecken neue Möglichkeiten im Hinblick auf eine leicht zu generierende Datenbasis.

Abschließend wurde eine Analyse potentieller Fehlerquellen durchgeführt, die die empirische Analyse abrundet und die während der Datenauswertung festgestellten Auffälligkeiten und Unstimmigkeiten zusammenfasst. Im Hinblick auf zukünftige, weiterführende Untersuchungen wurden zudem Lösungsansätze genannt.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Mit der Zunahme der Verkehrsbelastung auf deutschen Straßen aufgrund kontinuierlich steigender Fahrzeugbestände ergibt sich die Notwendigkeit zur Verkehrsflussoptimierung mittels geeigneter beeinflussender Maßnahmen. Der automatischen Verkehrsdatenerfassung kommt hierbei innerhalb des Verkehrsmanagements eine besondere Rolle zu, um zuverlässige Aussagen über den Verkehrszustand generieren zu können. Die Erfassung des Verkehrszustandes sowie der Zustandsänderungen erfolgt über Verkehrsdetektoren. Diese zeichnen die Merkmale und Eigenschaften des Verkehrs automatisch auf. Je nach Einsatzbereich ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an die Erfassung. Die verschiedenen Detektoren haben wiederum verschiedene Fähigkeiten und eignen sich daher mehr oder weniger gut für die vorhandenen Aufgabenstellungen. Gängige Detektionssysteme sind beispielsweise Induktionsschleifen, die im breiten Rahmen zum Beispiel zur Signalsteuerung an Lichtsignalanlagen zum Einsatz kommen, oder auch Videodetektoren mit deren Hilfe strecken- und netzbezogene Kenngrößen ermittelt werden können. Die in der Praxis üblicherweise zum Einsatz kommenden automatischen Erfassungseinrichtungen sind größtenteils kostenintensiv und mit hohem Aufwand hinsichtlich der Montage verbunden. Sie eignen sich aufgrund dessen insbesondere für längerfristige bzw. dauerhafte Messungen und werden daher fest montiert. Ein einfach und schnell zu installierendes Detektionssystem, mit dessen Hilfe kurzfristig Trends im Verkehrsfluss aufgezeichnet werden können und das dabei mit geringem Aufwand und möglichst niedrigen Kosten verbunden ist, fehlte bisher im Bereich der automatischen Erfassungssysteme. Als neuer, gewinnbringender Ansatz kann hierfür die Verkehrserfassung auf Basis der Bluetooth-Technologie gesehen werden.

Als zentrale Frage dieser Arbeit stand demnach die Überprüfung der Eignung der Bluetooth-Technologie für die Anwendung im Straßenverkehrsmanagement im Mittelpunkt der Betrachtung.

Die Bluetooth-Detektion ermöglicht die Fahrzeugerkennung auf Basis der Erfassung der eindeutigen MAC-Adresse bluetoothfähiger mobiler Endgeräte, die im Fahrzeug mitgeführt werden. Als mobile Endgeräte kommenden Mobiltelefone, Laptops, Autoradios, Navigationsgeräte etc. in Frage. Die MAC-Adresse erlaubt eine eindeutige Identifizierung des Fahrzeugs und ermöglicht damit die netzweite Fahrzeugverfolgung.

Aufbauend auf den generell für Detektoren geltenden Anforderungen, deren Einhaltung eine korrekte und qualitativ hochwertige Arbeitsweise impliziert, wurden Qualitätskriterien zur Beurteilung der Bluetooth-Technologie in Bezug auf den Einsatz als Verkehrsdetektor abgeleitet. Anhand dieser Kriterien wurde anschließend die qualitative Bewertung nachvollzogen. Dabei wurde auf die Kriterien Datenerfassung, Handhabung, Wirtschaftlichkeit und den Einsatzbereich eingegangen. Vorteile der Technik konnten insbesondere hinsichtlich der Montage und Instandhaltung festgestellt werden. Die einfache und schnelle Installierbarkeit sowie der mit geringem Aufwand verbundene Betrieb erlauben den Einsatz der Bluetooth-Detektoren vor allem für kurz- und mittelfristige Messungen, bei denen die Ausstattung der betrachteten Strecke mit den gängigen Erfassungseinrichtungen in keinem vernünftigen Kosten-Nutzen-Verhältnis steht. Demgegenüber zeichnet sich die Bluetooth-Technik durch geringe Anschaffungskosten aus. Schwächen wurden dagegen bei der Genauigkeit der erfassten Kenngrößen aufgedeckt. So zeigte sich, dass vor allem für streckenbezogene Kenngrößen wie Reisezeiten und Geschwindigkeiten aufgrund fehlender Positionsbezüge innerhalb des Erfassungsradius Genauigkeitsverluste auftreten. Darüber hinaus

kann der Verkehrsfluss nicht in seiner Gesamtheit erfasst werden – die richtungs- und spurbezogene Zuordnung der erhobenen Daten ist nur bedingt bzw. überhaupt nicht möglich. Die Voraussetzung der Mitführung eines aktivierten bluetoothfähigen Gerätes im Fahrzeug schränkt die detektierbare Verkehrsmenge zudem prozentual ein.

Trotz der Schwächen der Bluetooth-Detektoren im Bereich der Qualität der erhobenen Daten kann dennoch von einer Eignung für den Einsatz bei der Verkehrslageerfassung ausgegangen werden. So kann die Verkehrserfassung insbesondere von den Fähigkeiten hinsichtlich der Erstellung von Quelle-Ziel-Beziehungen und der damit verbundenen durchführbaren netzweiten Erfassung profitieren, die so bisher nur mit Hilfe der automatischen Kennzeichenerfassung per Videodetektion oder mit Hilfe von Floating Car Data (FCD) der im Verkehrsfluss schwimmender Fahrzeuge möglich gewesen ist. Hinzu kommt die Möglichkeit zum von Stromversorgungs- und Datenübertragungsinfrastrukturen unabhängigen Akku-Betrieb, der einen autarken und damit sehr flexiblen Einsatz ermöglicht.

Im Rahmen eigener Erhebungen wurden eigens am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt entwickelte Bluetooth-Detektoren im realen Umfeld getestet. Das Ziel der empirischen Untersuchung bestand darin, systematisch die Erfassung spezieller verkehrstechnischer Kenngrößen zu analysieren und damit die praxisbezogene Anwendbarkeit der Bluetooth-Detektoren zu belegen. Die Messungen erfolgten an der LSA-gesteuerten Kreuzung Ernst-Ruska-Ufer / Köpenicker Str. in Berlin Adlershof. Im März 2011 wurden über eine gesamte Woche (Montag bis Freitag) Daten für 5 Detektionsstandorte erhoben. Im Vorfeld fanden darüber hinaus Testmessungen statt. Für Referenzmessungen wurden Induktionsschleifendetektoren genutzt.

Der Vergleich zwischen den mit Bluetooth erfassten Daten und Referenzdaten aus Induktionsschleifenmessungen erlaubte die Ermittlung von Erfassungsraten. Da nicht jedes Fahrzeug mit einem bluetoothfähigen Gerät ausgestattet ist, kann nur ein Bruchteil des Gesamtverkehrs mit den Bluetooth-Detektoren erfasst werden. Die Gegenüberstellung zu den Referenzdaten ergab diesbezüglich Erfassungsraten von 30 %. Die Wiedererkennungsrate, d.h. der Anteil der Fahrzeuge, die an einem zweiten Detektor wiedererkannt wurde, lag dagegen bei 15 %. Solche prozentualen Anteile können als belastbare Grundlage für darauf aufbauende Hochrechnungen des tatsächlichen Verkehrsaufkommens sowie weiterführend für Beurteilungen des Verkehrsflusses dienen. Die Ergebnisse unterstützen zudem die gängigen Literaturangaben. Mit den Messungen im realen Umfeld konnte darüber hinaus die im theoretischen Analyseteil als Schwachstelle gesehene Unschärfe streckenbezogener Kenngrößen relativiert werden. Es zeigte sich, dass sowohl Reisezeiten als auch Geschwindigkeiten zufriedenstellende Ergebnisse lieferten, die in der Lage waren, die reale Verkehrssituation tendenziell korrekt abzubilden. Als Voraussetzung für den Einsatz konnte diesbezüglich die Durchflussmenge der betrachteten Strecke identifiziert werden. Nur wenn eine gewisse Mindestverkehrsmenge nicht unterschritten wird, kann der mit Bluetooth erzielbare prozentuale Anteil als Repräsentant des Gesamtverkehrs gelten. Laut Literaturrecherche liegt die Grenze der Durchflussmenge bei etwa 500 bis 600 Fahrzeugen pro Stunde. [HAGH10], [TARN08]

Mit der eindeutigen Wiedererkennbarkeit der Fahrzeuge konnten Quelle-Ziel-Relationen identifiziert und darauf aufbauende Bewegungsprofile erstellt werden. Obwohl die Erstellung von Bewegungsprofilen einerseits noch ein gewisses datenschutzrechtliches Konfliktpotential in sich birgt, bietet es andererseits Ansätze zur Ermittlung prozentualer Verteilungen der Routenströme.

In diesem Zusammenhang eröffnen sich insbesondere für das Verkehrsmanagement und die Verkehrsplanung vielfältige Möglichkeiten zur netzweiten Steuerung und Beeinflussung des Verkehrs sowie zur Planung von Maßnahmen.

Das Potential der Bluetooth-Detektoren liegt in der zunehmenden Verbreitung dieser Technologie. Sowohl Handys, Headsets, Notebooks und PDA sind mit Bluetooth-Schnittstellen ausgestattet. Ebenso kann eine zunehmende Verwendung bei fahrzeugspezifischen Anwendungen, wie z.B. Navigationsgeräten, Autoradios und Bordcomputern beobachtet werden. Aufgrund der Reife verfügbarer Standards bietet die Bluetooth-Technologie vielfältige Möglichkeiten zur Erfassung entsprechend ausgestatteter Geräte. Entscheidend für die Erfassung der mit Bluetooth ausgestatteten Mobiltelefone ist jedoch nicht nur das Vorhandensein dieser Funktion, sondern auch deren Aktivität. Nur wenn die Funktion tatsächlich genutzt und dementsprechend eingeschaltet ist, kann das Gerät detektiert werden. Laut einer in den USA 2009 unter Smartphone-Besitzern durchgeführten Umfrage [STAT09] nach den meistgenutzten Funktionen ihres Smartphones gaben diesbezüglich 37 Prozent aller Befragten an, Bluetooth zu verwenden. Da diese Befragung jedoch auch Nutzer unter 18 Jahren einschloss, muss davon ausgegangen werden, dass der Prozentsatz Auto fahrender Handybesitzer, die Bluetooth nutzen und auch dauerhaft aktiviert haben, geringer ausfällt. Selbst bei pessimistischer Annahme von 10 Prozent, würde sich jedoch somit auf ca. 55 Millionen zugelassene Fahrzeuge in Deutschland berechnet, immerhin eine erfassbare Verkehrsmenge von 5,5 Millionen Fahrzeugen allein für die deutschen Straßen ergeben. [BITK07]

In Zukunft kann von einer immer stärkeren Verbreitung der Technologie zur Einbindung und Verknüpfung verschiedener mobiler Endgeräte ausgegangen werden. Dies impliziert wiederum einen immer höheren Anteil an erfassbaren Fahrzeugen im Gesamtverkehrsaufkommen, womit wiederum die Aussagekraft und Belastbarkeit der erhobenen Daten wächst. Die innerhalb der Arbeit aufgeführten potentiellen Einsatzbereiche spiegeln zum großen Teil auch weitere, denkbare Anwendungsgebiete wider, sodass an dieser Stelle auf die in Abschnitt 4.3 aufgeführten Denkanstöße verwiesen sei.

Um die Bluetooth-Technologie im Rahmen der Verkehrserfassung zukünftig noch attraktiver zu gestalten, lohnt es sich, die bereits begonnenen Forschungsarbeiten zur Nutzung des Signalstärkeindikators RSSI zur Genauigkeitserhöhung der Positionsangaben innerhalb des Erfassungsradius weiterzuverfolgen. Es zeigte sich innerhalb der durchgeführten Untersuchungen, dass sich mit der Zunahme der Häufigkeit der Erfassung auch der Verlauf der Signalstärkekurve spezifizierte und somit Angaben zur Position des erfassten Fahrzeuges gegenüber dem Detektor besser eingegrenzt werden konnten. Parallel hierzu erscheinen weiterführende Arbeiten zur Beschleunigung des Inquiry-Vorganges als besonders sinnvoll. Mit der schnelleren Abfrage der Frequenzen würde sich einerseits die Wahrscheinlichkeit zur Erfassung von Fahrzeugen erhöhen, andererseits würden bereits erkannte Geräte häufiger wiedererkannt werden können, sodass insgesamt eine Erhöhung der belastbaren Datenmenge resultieren würde.

Hinsichtlich der Nutzung der mobilen Endgeräte als Ressource für die Verkehrserfassung existieren weitere Forschungsarbeiten, die sich beispielsweise mit der Erfassung von Fahrzeugen auf Basis der WiFi (WLAN)-Technologie beschäftigen. Diese bietet aufgrund ihrer höheren Reichweiten und der schnelleren Ortung Vorteile gegenüber Bluetooth. Als nachteilig wird jedoch die Aus-

stattung der Fahrzeuge mit entsprechenden WLAN-Adaptern gesehen. Diese liegt bisher weit unter der Verbreitung der Bluetooth-Technologie und ist zudem kostenintensiver.

Zusammengefasst kann die Detektion auf Basis der Bluetooth-Technologie als sinnvolle Ergänzung bisheriger Verkehrserfassungssysteme gesehen werden. Vorzugsweise erscheinen Streckenabschnitte, die bisher keine technische Ausstattung besitzen, als geeignete Anwendungsfelder. So wird insbesondere der temporäre Einsatz der Bluetooth-Technologie zur zeitweiligen Auslastungsmessung als gewinnbringend erachtet.

8 Quellenverzeichnis

- [AHME07] Ahmed, H.; El-Darieby, M.; Abdulhai, B.; Morgan, Y.: „A Bluetooth- and WI-FI-Based Mesh Networks Platform for Traffic Monitoring“, Beitrag zum TRB 2008 Annual Meeting, 2007 <http://pubsindex.trb.org/view.aspx?id=848240> (Stand: 11.07.2011)
- [ANAS03] Anastasi, G.; Bandelloni, R.; Conti, M.; Del mastro, F.; Gregari, E.; Mainetto, G.: „Experimenting an Indoor Bluetooth-based Positioning Service“, Beitrag zur 23. International Conference on Distributed Computing Systems, Washington, 2003
- [BAST02] BAST – Bundesanstalt für Straßenwesen: „Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen (TLS)“, Ausgabe 2002, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Sachgebiet Verkehrstechnik, Bergisch Gladbach, 2002
- [BAUM08] Baumann, A.: „Vergleichende Bewertung unterschiedlicher Detektorarten im Straßenverkehr“, Diplomarbeit, TU-Darmstadt, 2008
- [BITK] BITKOM – Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V.: „Zahl der Mobilfunkanschlüsse steigt weiter in Deutschland“, Beitrag vom 13.03.2007, Berlin http://www.bitkom.org/de/presse/49919_44673.aspx (Stand: 11.07.2011)
- [BLUE06] All About Security: „Bluetooth – Die Grundlagen“ <http://www.all-about-security.de/security-artikel/endpoint-sicherheit/mobile-computing-und-pdas/artikel/282-bluetooth-die-grundlagen/> (Stand: 11.07.2011)
- [BLUE11] Bluetooth: „The Official Bluetooth Wireless Info Site“ <http://www.bluetooth.com> (Stand: 11.07.2011)
- [BNUT03] Holzmann, C.; Oppl, S.: „Bluetooth in a Nutshell [Context Framework for Mobile User Applications Strategic Alliance Siemens AG – JKU Linz]“, Universität Linz, Linz, 2003
- [BONN08] Stadtwerke Bonn Bus und Bahn: „Das HandyTicket für Bonn“ <http://www.haendyticket.de/> (Stand: 11.07.2011)
- [BREN09] Brennan Jr., T. M.: „Influence of Vertical Sensor Placement on Data Collection Efficiency from Bluetooth MAC Address Collection Devices“, Purdue University, Beitrag für das Journal of Transportation Engineering, Ausgabe Juni 2010, 2009
- [BSIG11] Bluetooth Special Interest Group (SIG): „The Official Bluetooth SIG Membership Site“, <https://www.bluetooth.org> (Stand: 11.07.2011)
- [BSPE09] Bluetooth Special Interest Group (SIG): „Specification of the Bluetooth System“, Bluetooth Spezifikation, Band 1, Core, Version 4.0, 2009 <https://www.bluetooth.org> (Login erforderlich) (Stand: 11.07.2011)
- [BUHL07] Buhle, S.: „Rekonstruktion von Fahrzeugtrajektorien aus Induktionsschleifendaten“, Diplomarbeit, Humboldt-Universität zu Berlin, Institut für Informatik, 2007

- [BULL09] Bullock, D. M.; Hasemann, R.; Wasson, J. S.; Spitler, R.: „Anonymous Bluetooth Probes for Measuring Airport Security Screening Passage Time: The Indianapolis Pilot Deployment“, Beitrag zum TRB 2010 Annual Meeting, Purdue University, 2009
- [CCOM06] C.C.Com Andersen & Moser GmbH: „Offenlegungsschrift“, Patentanmeldung beim Deutschen Patent- und Markenamt, Anmeldetag 12.10.2006, Offenlegungstag 16.05.2007
- [EISO05] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: „Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe (ISO 9000:2005)“, ISO-9000-Normenreihe, Ausgabe 2005-12, Beuth-Verlag, Berlin, 2005
- [EISS96] Eißler, W.: „Sensorik“, Band 5, aus ‚Praktischer Einsatz von berührungslos arbeitenden Sensoren; Auswahlkriterien und Anwendungsbeispiele aus der Automatisierungs- und Steuerungstechnik‘, 2. Auflage, Expert-Verlag, Stuttgart, 1996
- [EMVE91] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): „EVE – Empfehlungen für Verkehrserhebungen“, Ausgabe 1991, FGSV-Verlag, Köln, 1991
- [FALL08] Fallast, K.; Scholz, A.; Ekam, H. W.: „Sichere Basis für Verkehrsplanung – Erfassung von Fahrgastströmen via Bluetooth“, aus der Zeitschriftenreihe ‚Der Nahverkehr‘, Ausgabe 9/2008
- [FELD03] Feldmann, S.; Kyamakya, K.; Zapater, A.; Lue, Z.: „An Indoor Bluetooth-based Positioning System: Concept, Implementation and Experimental Evaluation“, Beitrag zur International Conference on Wireless Networks, Las Vegas, 2003
- [FGSV01] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): „Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS)“, Ausgabe 2001, FGSV-Verlag, Köln, 2001
- [FGSV05] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: „Hinweise zum Fundamentaldiagramm, Grundlagen und Anwendungen“, Ausgabe 2005, FGSV-Verlag, Köln, 2005
- [FGSV06] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): „Hinweise zur Qualitätsanforderung und Qualitätssicherung der lokalen Verkehrsdatenerfassung für Verkehrsbeeinflussungsanlagen“, Ausgabe 2006, FGSV-Verlag, Köln, 2006
- [FGSV10] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: „Hinweise zur kurzzeitigen automatischen Erfassung von Daten des Straßenverkehrs“, Ausgabe 2010, FGSV-Verlag, Köln, 2010
- [FGSV86] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: „Merkblatt über Verkehrserhebungen und Datenschutz“, Ausgabe 1986, FGSV-Verlag, Köln, 1986
- [FGSV87] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: „Hinweise für den kurzzeitigen Einsatz von Straßenzählgeräten – Ergänzung zu den Richtlinien für Verkehrserhebungen“, Ausgabe 1987, FGSV-Verlag, Köln, 1987

- [FGSV91] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: „Merkblatt über Detektoren für den Straßenverkehr“, Ausgabe 1991, FGSV-Verlag, Köln, 1991
- [FSST04] Steyer, R.; Feser, B.; Knelangen, F.-J.: „Qualität von Daten im Straßen- und Verkehrswesen“, aus Schriftenreihe ‚Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik‘, Heft 904, Bonn, 2004
- [FSST73] Steierwald, G.; Heusch, H.; Schmidt, G.: „Untersuchungen zur automatischen Erfassung von Verkehrsdaten auf Bundesfernstraßen“, aus Schriftenreihe ‚Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik‘, Heft 141, Bonn, 1973
- [GESS09] Gessler, R.; Krause, T.: „Wireless-Netzwerke für den Nahbereich [Eingebettete Funk-systeme: Vergleich von standardisierten und proprietären Verfahren]“, 1. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 2009
- [HAGE08] Weinzerl, J.; Hagemann, W.: „Automatische Erfassung von Umsteigern per Bluetooth-Technologie“, aus der Zeitschriftenreihe ‚Nahverkehrs-praxis‘, Ausgabe 3/2008
- [HAGH10] Haghani, A.; Hamed, M.; Farokhi Sadabadi, K.; Young, S.; Tarnoff, P.: „Freeway Travel Time Ground Truth Data Collection Using Bluetooth Sensors“, University of Maryland, Paper zum TRB 2010 Annual Meeting, 2010
- [HILT96] Hilty, L. M.; Page, B.; Meyer, R.; Mügge, H.; Deecke, H.; Poll, M.: „Konzeption eines Systems zur Abschätzung der Auswirkungen verkehrsbezogener Maßnahmen auf die Umwelt“, Bericht des Fachbereichs Informatik, Universität Hamburg, Bereich Nr. 184, Hamburg, 1996 <http://www.informatik.uni-hamburg.de/bib/medoc/B-184.pdf> (Stand: 11.07.2011)
- [HOLT03] Holtkamp, H.: „Einführung in Bluetooth“, Referat zum Seminar ‚Bluetooth Grundlagen‘, Universität Bielefeld, Bielefeld, 2003, <http://www.rvs.uni-bielefeld.de/~heiko/bluetooth/bluetooth.pdf> (Stand: 11.07.2011)
- [HOYE11] Hoyer, R.; Leitzke, C.: „Verfahrenstechnische Bedingungen für die Reisezeitbestimmung mittels Bluetooth-Technologie“, Beitrag zur Heureka 2011, Universität Kassel, Fachgebiet Verkehrstechnik und Transportlogistik, Kassel, 2011
- [IMDD05] Verkehrsverbund Oberelbe (VVO), Projekt ‚Intermobil Region Dresden‘: „ALLFA-Ticket“ http://www.vvo-online.de/de/ueber_den_vvo/projekte_und_initiativen/abgeschlossene_projekte/allfa.aspx (Stand: 11.07.2011)
- [ITEJ08] Wasson, J. S.; Sturdevant, J. R.; Bullock, D. M.: „Real-Time Travel Time Estimates Using Media Access Control Address Matching“, ITE Journal, Ausgabe Juni 2008 <http://www.ite.org/membersonly/itejournal/pdf/2008/JB08F.pdf> (Stand: 11.07.2011)
- [KOLI11] KreisVerkehr Schwäbisch Hall GmbH: „KOLIBRICARD - die neue Generation des Ticketing“ <http://www.kolibricard.de/> (Stand: 11.07.2011)

- [KOST06] Kostencki, K.: „Seminar Verkehrsinformatik eTicketing“, Vorlesungsskript, Fachhochschule Wedel, 2006 <http://www.fh-wedel.de/archiv/iw/Lehrveranstaltungen/SS2006/SeminarVI/Vortrag3eTicketingKostencki.pdf> (Stand: 11.07.2011)
- [LEHN05] Lehnhoff, N.: „Überprüfung und Verbesserung der Qualität von automatisch erhobenen Daten an Lichtsignalanlagen“, Dissertation, Universität Hannover, Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie, Hannover, 2005
- [MALI09] Malinowski, Y.; Wu, Y.-J.; Wang, Y.; Lee, U.-K.: „Field Experiments on Bluetooth-based Travel Time Data Collection“, Beitrag zum TRB 2010 Annual Meeting, University of Washington, Department of Civil and Environmental Engineering, Washington D.C., 2009
- [MARY08] Young, S.: „Bluetooth Traffic Monitoring Technology [Concept of Operation & Deployment Guidelines]“, Konzeptpapier, University of Maryland, 2008 http://www.catt.umd.edu/documents/UMD-BT-Brochure_REV3.pdf (Stand: 11.07.2011)
- [MEIL11] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR): „Alternative Erfassungsmethoden sind analysiert und getestet“, Meilensteinbericht, Institut für Verkehrssystemtechnik, Abteilung Verkehrsmanagement, Projektgruppe VMM (Verkehrs- und Mobilitätsmanagement), Berlin, 2011
- [MULL01] Müller, N. J.: „Bluetooth [Die Referenz für den neuen Bluetooth-Standard; Protokoll, Architektur, Datenaustausch; Sicherheitsmodelle der Bluetooth-Spezifikation]“, 1. Auflage, MITP-Verlag, Bonn, 2001
- [MUTZ07] Ingenieurbüro für Nachrichtentechnik Jörg Mutzbauer, Pressemeldung vom 29.01.2007 in den Kieler Nachrichten: „mAIS sucht den richtigen Bus - Informationssystem für Behinderte im Test“ http://www.mutzbauer.de/presse_mAIS.php (Stand: 11.07.2011)
- [PARS08] Fallast, K.: „Parson – Passenger Registration System based on Bluetooth and Satellite Navigation“, Technische Universität Graz, 2008
- [PIER10] Pierer, F.: „Reisezeitermittlung und Verkehrslage in Straßennetzen – Fallstudie Use- dom“, Vortrag im Rahmen des 17. Verkehrstechnischen Seminars am 04.11.2010, Cunnersdorf, 2010
- [RASQ96] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: „RAS-Q - Richtlinien für die Anlage von Straßen“, Ausgabe 1996, FGSV-Verlag, Köln, 1996
- [RILS10] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: „RiLSA - Richtlinien für Lichtsignalanlagen – Lichtzeitanlagen für den Straßenverkehr“, Ausgabe 2010, FGSV-Verlag, Köln, 2010
- [SACH02] Sachse, T.: „Die Messwertqualität autarker Detektionssysteme am Beispiel des Traffic Eye Universal“, in Schriftenreihe ‚Straßenverkehrstechnik‘, Jahrgang 46, Heft 9, 2002

- [SCHM10] Schmietendorf, G.: „Bewertung der Qualität des Verkehrsablaufs in städtischen Netzen“, Studienarbeit, TU-Dresden, 2010
- [STAT09] Statista GmbH: „Meistgenutzte Funktionen von Smartphones durch Nutzer in den USA (Juni 2009)“, Erhebungszeitraum 19.05.2009 bis 08.06.2009, Altersgruppe ab 14 Jahren, Untersuchungsraum: USA, Nordamerika, veröffentlicht durch Crowd Science (crowdscience.com) <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/13029/umfrage/genutzte-funktionen-von-smartphones-%28usa%29/> (Stand: 11.07.2011)
- [STEI05] Steierwald, G.; Künne, H. D.; Vogt, W.: „Stadtverkehrsplanung“, 2. neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Springer- Verlag Berlin Heidelberg, 2005
- [STVO09] Bundesministerium der Justiz: „VwV-StVO: Verwaltungsvorschrift zur Straßenverkehrsordnung“, Ausfertigungsdatum: 22.10.1998, Fassung vom 17.07.2009 http://www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/bsvwvbund_26012001_S3236420014.htm (Stand: 11.07.2011)
- [TARN08] Tarnoff, P. J.; Wasson, J. S.; Young, S.; Ganig, N.; Bullock, D. M.; Sturdevant, J. R.: „The Continuing Evolution of Travel Time Data Information Collection and Processing“, Beitrag zum TRB 2009 Annual Meeting, 2008 <http://pubsindex.trb.org/view.aspx?id=881513> (Stand: 11.07.2011)
- [TOMT11] TomTom Navigationsgeräte: „Wie funktioniert mein TomTom?“ <http://www.tomtom.com/howdoesitwork/page.php?ID=28&CID=8&Language=3> (Stand: 11.07.2011)
- [TOPO11] Topologien von Rechnernetzen [http://de.wikipedia.org/wiki/Topologie_\(Rechnernetz\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Topologie_(Rechnernetz)) (Stand: 11.07.2011)
- [TURN02] Turner, S.: „Defining and Measuring Traffic Data Quality“, White Paper, Traffic Data Quality Workshop, Texas, 2002, <http://ntl.bts.gov/lib/30000/30800/30855/2.1.pdf> (Stand: 11.07.2011)
- [VDVE05] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV): „Elektronisches Fahrgeld Managementsystem (EFM) - VDV-Kernapplikation ist der elektronische Ticket-Standard“ http://www.vdv.de/wir_ueber_uns/vdv_projekte/vdv_kernapplikation_efm.html?pe_id=48 (Stand: 11.07.2011)
- [WANG08] Wang, Y.-P.: „Optimierung der Quelle-Ziel-Matrixschätzung hinsichtlich Redundanzstörung sich verändernder Verkehrszustände“, Dissertation, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie, Hannover, 2008
- [WASS09] Wasson, J. S.; Hasemann, R. J.; Bullock, D. M.: „Real Time Measurement of Work Zone Travel Time Delay and Evaluation Metrics Using Bluetooth Probe Tracking“, Beitrag zum TRB 2010 Annual Meeting, Purdue University, 2009
- [WEIN11] Weinzerl, J.; Fast, A.: „Verkehrsablauf erkennen durch intelligente Sensoren auf Autobahnen und in urbanen Gebieten“, Beitrag zur Heureka 2011, c.c.com GmH, Graz, 2011

- [WERM02] Wermuth, M.: „Grundlagen zur Bemessung von Straßenverkehrsanlagen“, Skript zur Lehrveranstaltung ‚Stadtverkehrsplanung und Straßenverkehrstechnik‘, TU-Braunschweig, Braunschweig, 2002

Erklärung

Hierdurch erkläre ich, dass ich die von mir am heutigen Tage eingereichte Diplomarbeit selbstständig verfasst und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Dresden, den

.....

Gaby Schmietendorf

