

GEMEINSAMER

# ABSCHLUSSBERICHT

FÜR DAS



ZENTRALES INNOVATIONSPROGRAMM MITTELSTAND (ZIM)

## HOCHLEISTUNGSSENSORIK MIT CLOUD-BASIERTER ECHT-ZEIT-DATENVERARBEITUNG FÜR DIE DIGITALE STRASSE IM URBANEN- UND FERNVERKEHR

zum 31.12.2017

### Projektteilnehmer:

<p>Kai Okulla (Koordinator) Wilhelm Schröder GmbH Rammerberger Weg 5-10, 58849 Herscheid</p>	 <p><b>schröder</b> Metall · Kunststoff · Hybridtechnik</p>
<p>Prof. Dr.-Ing. Christian Wietfeld Technische Universität Dortmund Lehrstuhl für Kommunikationsnetze (CNI) Otto-Hahn-Str. 6, 44227 Dortmund</p>	 <p><b>tu</b> technische universität dortmund</p>
<p>Prof. Dr. Sabine Sachweh Fachhochschule Dortmund Angewandte Softwareentwicklung, Fachbereich Informatik Emil-Figge-Str. 42, 44227 Dortmund</p>	 <p><b>Fachhochschule Dortmund</b> University of Applied Sciences and Arts</p>

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Kurzfassung zum Abschlussbericht</b> .....	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Einleitung /Projektbeschreibung /Anforderungsprofil (AP1)</b> .....	<b>4</b>
<b>Endergebnisse der einzelnen Projektpartner</b> .....		<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Datengenerierung an der Strasse</b> .....	<b>7</b>
3.1	Anforderungen und Hardware .....	7
3.2	Hardware-basierte Softwareentwicklung .....	12
3.3	Hardwareentwicklung und Testfelder .....	19
<b>4</b>	<b>Fahrzeugdetektion und –klassifikation auf Basis Maschinellem Lernverfahren</b> .....	<b>33</b>
4.1	Entwicklung und Leistungsbewertung der Entscheidungsalgorithmen (AP3, AP4) .....	34
4.2	Aufbau eines Simulationsumfeldes für Radiotomographie (AP2) .....	57
4.3	Überführung der Klassifikationsalgorithmik auf eingebettete Systeme (AP5, AP6).....	65
4.4	Energiebilanzierung des Klassifikationssystems (AP7).....	69
4.5	Fazit .....	74
4.6	Literaturverzeichnis TU Dortmund.....	76
<b>5</b>	<b>Cloud-basierte Datenanalyse und –verarbeitung</b> .....	<b>77</b>
5.1	Auswahl und Einrichtung der Betriebs- und Entwicklungstechnologien (AP2, AP3) .....	77
5.2	Entwicklung der Komponenten der Smart-Data-Plattform (AP4, AP5, AP6, AP7) .....	79
5.3	Deklarative Datenverarbeitung .....	87
5.4	Demoanwendung (AP9, AP10, AP11) .....	90
5.5	Projektdokumentation (AP11).....	98
<b>6</b>	<b>Aktualisierung des Markteinführungskonzeptes</b> .....	<b>99</b>
6.1	Angezielte Märkte und angestrebte Marktanteile .....	99
6.2	Markteintrittsbarrieren und Strategien zu deren Überwindung.....	103
6.3	Beabsichtigte Massnahmen zur Markteinführung .....	104
6.4	Eindeutige technische und wirtschaftliche Zielkriterien .....	106
6.5	Meilensteine zur Erreichung der festgelegten Zielkriterien .....	106



## 1 KURZFASSUNG ZUM ABSCHLUSSBERICHT

Kurzbezeichnung des Vorhabens Hochleistungssensorik mit Cloud-basierter Echtzeit-Datenverarbeitung für die digitale Straße im urbanen und Fernverkehr	
Zuwendungsempfänger Wilhelm Schröder GmbH	Förderkennzeichen ZF4038001DB5
1) Aussichten auf Zielerreichung, evtl. notwendige Änderungen der Zielstellung, Anpassung des Arbeitsplanes (ggf. auch der Meilensteine) Im Berichtszeitraum ergaben sich keine Änderungen in der Zielsetzung und im Arbeitsplan.	
2) Inzwischen bekannt gewordene Ergebnisse Dritter mit Relevanz für das Vorhaben Es haben sich im Berichtszeitraum keine Ergebnisse Dritter mit Relevanz für die Durchführung des Vorhabens ergeben.	
3) Vergleich des Vorhabensstands mit dem geltenden Arbeitsplan (Meilensteine berücksichtigen) Der Vorhabensstand befindet sich im Rahmen des geltenden Arbeitsplans. Die im Projekt vorgesehenen Personalstellen konnten (wie in den Mittelabrufen bereits dargestellt) aufgrund personeller Engpässe erst verspätet voll besetzt werden.	
4) Sind Arbeitsplanänderungen notwendig (Laufzeitverlängerungen etc.) Aufgrund der Notwendigkeit der Ausdehnung von im Projekt durchgeführten Feldversuchen zur Evaluierung der Funktionalität des Gesamtsystems wurde das Projekt kostenneutral um fünf Monate bis zum 31.12.2017 verlängert.	
5) Vergleich des Mittelverbrauchs mit der Kostenplanung Der Mittelverbrauch bleibt im vorgegebenen Rahmen. Die im Projekt vorgesehenen Personalstellen konnten (wie in den Mittelabrufen bereits dargestellt) aufgrund personeller Engpässe erst verspätet voll besetzt werden.	
6) Wie hat sich die Zusammenarbeit mit den Kooperationspartnern entwickelt? Die Durchführung der einzelnen Arbeiten der entsprechenden Arbeitspakete erfolgte in enger Kooperation der Projektpartner, der TU Dortmund, der FH Dortmund und der Wilhelm Schröder GmbH. In den Arbeitspaketen, in denen eine genaue Abstimmung der weiteren Schritte erforderlich war, bspw. im Bereich Sensordatenstruktur, wurden die gemeinsamen Fortschritte durch Weitergabe von Informationen vorangetrieben. Arbeitspaketübergreifende Arbeiten wurden dabei gemeinsam durchgeführt. Zudem sind regelmäßige Projektmeetings (etwa einmal im Monat) durchgeführt worden, an denen alle Mitarbeiter teilnahmen. Hierbei wurden weitere Schritte besprochen und neue Ideen entwickelt, die sich positiv auf die Entwicklung des Projektes ausgewirkt haben.	

Ort: Herscheid

Datum: 09.03.2018

---

 Kai Okulla, Wilhelm Schröder GmbH

## 2 EINLEITUNG /PROJEKTDESCHEIBUNG /ANFORDERUNGSPROFIL (AP1)

Der Wandel des Verkehrs zur Adressierung der infrastrukturellen Herausforderungen wird seitens der Politik aktuell stark unterstützt. Die Digitalisierung der Infrastruktur zur Schaffung einer intelligenten Mobilität sowie die Vernetzung der Verkehre der Zukunft sollen dabei aktiv gestaltet werden<sup>1</sup>. Dafür ist es notwendig, neben der Kommunikation zwischen Fahrzeugen auch die Entwicklung der Infrastruktur, der „Digitalen Straße“, voranzutreiben.

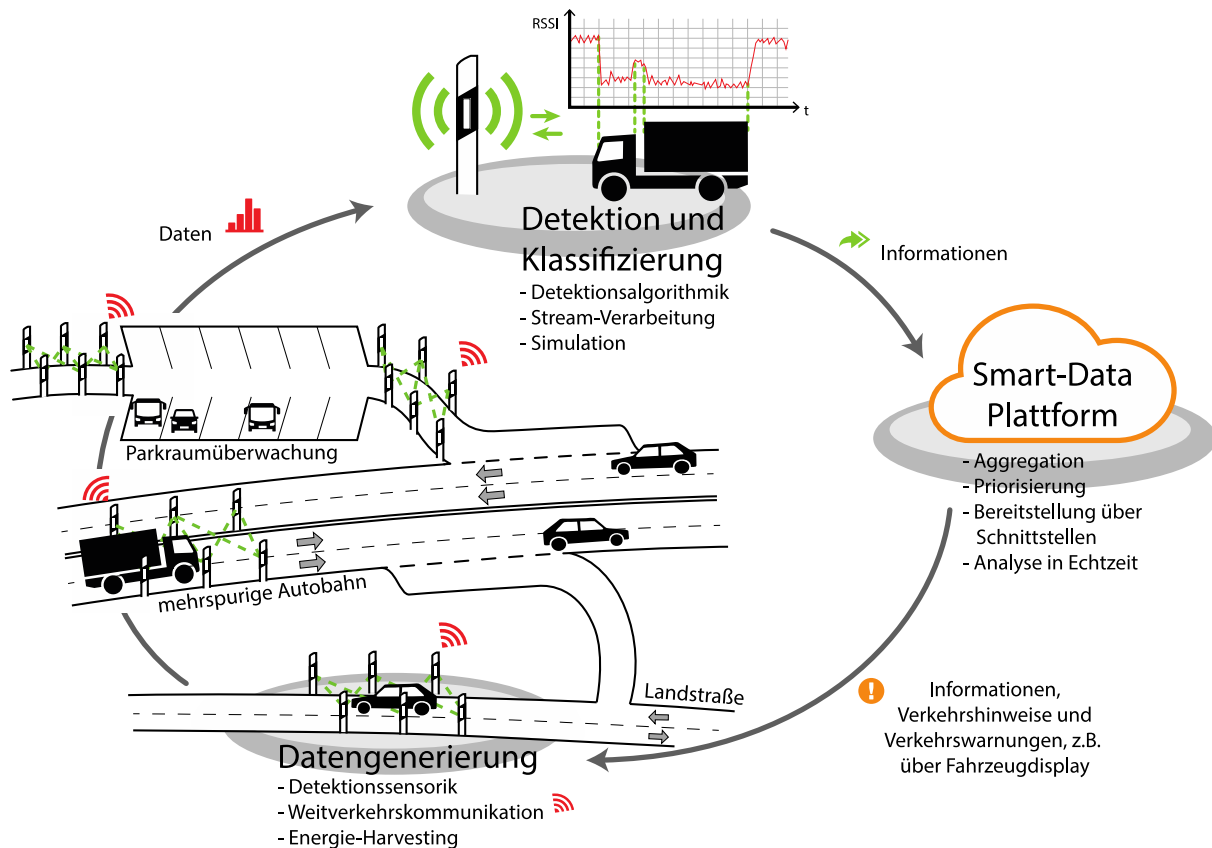
Um durch Digitalisierung einen Mehrwert in Bezug auf die Bewältigung der infrastrukturellen Herausforderungen zu schaffen und so einen Beitrag zu leisten, der insbesondere auch für die Gesellschaft und Politik relevant ist, sind standortübergreifende und vernetzte Anwendungen für eine digitale Straße notwendig. **Dazu sind Möglichkeiten zu etablieren, die es erlauben, Verkehrsdaten flächendeckend in Echtzeit zu erfassen, sie miteinander und unter Hinzunahme weiterer Informationen wie den Witterungsverhältnissen und der Feinstaubbelastung zu verknüpfen und beispielsweise für eine intelligente und umfassende Verkehrsflusssteuerung sowie -bilanzierung auch im urbanen Raum zu nutzen.** Dieses Projekt greift als konkretes Beispiel für die Verkehrsbilanzierung ein intelligentes Parkleitsystem für PKW und LKW an Autobahnrastparkplätzen auf, das die Verkehrsteilnehmer über freie Parkmöglichkeiten informiert und sie bei der Auffindung unterstützt.

Erste Vorarbeiten für die Realisierung eines Sensorsystems der „Digitalen Straße“ wurden im Rahmen des Projektes Falschfahrerwarnsystem (ZIM KF2144703DB0) entwickelt. Hierbei ist ein neues, funkbasiertes Sensorsystem entstanden, welches in Leitpfosten integriert energieautark betrieben werden kann. Für eine weitere Informationsverarbeitung, Aggregation, Verknüpfung und Weiterverteilung der erfassten Sensordaten ist eine Echtzeitübertragung an eine Smart-Data-Plattform notwendig, um den Gedanken der digitalen Vernetzung der Infrastruktur weiterzuentwickeln und ein breiteres Anwendungsfeld zu erschließen. Um das Ziel dieses Projektes zu erreichen, werden in einem letzten Schritt sowohl das optimierte und funkbasierte Sensorsystem als auch die neu entwickelte Smart-Data-Plattform miteinander verknüpft.

Abbildung 1 verdeutlicht den Aufbau der Gesamtinfrastruktur, die ausgehend von der an der Straße installierten energieautarken Detektionssensorik durch neue Algorithmen und Methoden der Stream-Verarbeitung eine Erfassung von Fahrzeugen inklusive der Klassifizierung auf mehrspurigen Fahrbahnen erlaubt. Die ermittelten Daten werden über eine Smart-Data-Plattform zur Weiterverarbeitung (z. B. Information, Verkehrsflusssteuerung) bereitgestellt.

---

<sup>1</sup> BMVI (2013): Intelligente Verkehrssysteme im Straßenverkehr, Juni 2013, <http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/ivs-im-strassenverkehr.html>

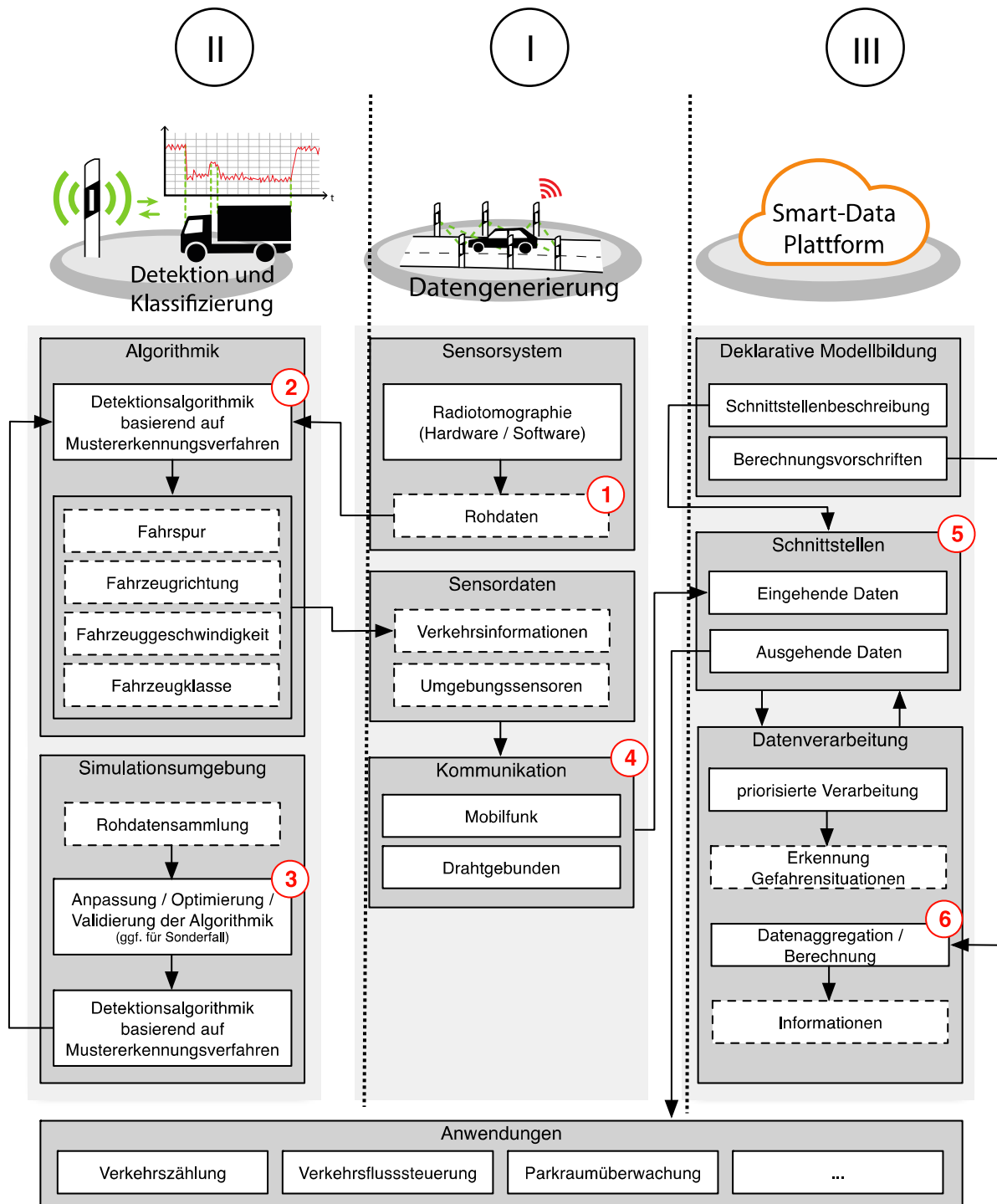


**Abbildung 1:** Darstellung der Gesamtinfrastruktur

Aus dem geplanten Aufbau des Funktionsmusters der Gesamtinfrastruktur (Abbildung 1) gehen drei wesentliche Innovationen hervor, die in mehrere Prozessschritte untergliedert und von unterschiedlichen Projektpartnern verantwortet werden (siehe Abbildung 2):

- I. Wilhelm Schröder GmbH: Entwicklung eines Konzepts zur Integration einer **Hochleistungs- und Präzisionsensorik für Radiotomographie** (1) sowie einer Weitverkehrskommunikation basierend auf einer durch Energy Harvesting autarken Energieversorgung (4)
- II. TU Dortmund: Entwicklung neuer **Detektions- und Klassifikationsalgorithmen** (2) basierend auf Streaming-Methoden unter Verwendung einer Simulationsumgebung (3) für die zuverlässige Erkennung von Fahrzeuginformationen (Fahrtrichtung, Klassifizierung, Geschwindigkeit) auf mehrspurigen Fahrbahnen
- III. FH Dortmund: Entwicklung einer **Smart-Data-Plattform** (6) zur priorisierten Verarbeitung und Speicherung von Verkehrsdaten unter Echtzeitanforderungen sowie der Bereitstellung von Konfigurations- und Analysemöglichkeiten, um Schnittstellen (5) zu aggregierten Datenströmen anwendungsspezifisch bereitzustellen

Dieses Dokument beschreibt den Projektfortschritt von August 2015 bis Dezember 2017. Die angestrebte Infrastruktur gliedert sich in drei Teilbereiche, die in Abbildung 2 dargestellt sind und zusammen die Prozessschritte während der Entwicklung und des Betriebs des Gesamtsystems beschreiben.



**Abbildung 2:** Prozessschritte der Gesamtinfrastruktur des Projektvorhabens

## ENDERGEBNISSE DER EINZELNEN PROJEKTPARTNER

Die erfolgten Arbeiten in den jeweiligen Arbeitspaketen aller Projektpartner werden beschrieben. Die Aufgabenverteilung nach Projektpartner erfolgt dabei durch drei Teilbereiche und ist in diesem Dokument klar nach den geleisteten Arbeiten der Partner getrennt. Jeder Projektpartner ist dabei für die Berichtsführung seiner Aufgabenbereiche eigenverantwortlich. Gemeinsam durchgeführte Entwicklungen sind in diesem Dokument zusätzlich gekennzeichnet.

### 3 DATENGENERIERUNG AN DER STRASSE

**Verantwortlicher Partner:** Wilhelm Schröder GmbH

Dieser Abschnitt befasst sich mit der straßenseitigen Hochleistungssensorik zur Detektion von Fahrzeugen. Dabei wird zunächst auf die Anforderungen eingegangen, welche an die Sensorik zu stellen sind, um zum einen den unterschiedlichsten Gegebenheiten an der Straße zu genügen (Leitplanken, mehrspurige Fahrbahnen etc.) und zum anderen den verkehrstechnischen Vorgaben (Fahrzeugklassifizierung, Datenformate usw.) zu entsprechen.

Speziell im Bereich der Daten ist eine detaillierte Abstimmung mit dem Partner FH Dortmund notwendig. Die Hardware wird dementsprechend konzipiert und entwickelt. Die softwareseitige Optimierung des Sensorsystems erfolgt in enger Zusammenarbeit mit dem Partner TU Dortmund, der mit seinen Möglichkeiten zur Analyse und Simulation wesentlichen Einfluss auf die Entwicklungen der Sensorik nimmt.

Neben der software-seitigen Entwicklung der Sensorik lag die Entwicklung der Hardware im Fokus dieses Projekts. Hierbei wurden der Aufbau der Hardware und die einzelnen Komponenten rekursiv optimiert, ausgehend von den Ergebnissen des ausgedehnten Testbetriebs des gesamten Systems in verschiedenen Szenarien.

#### 3.1 ANFORDERUNGEN UND HARDWARE

Um die Übersicht über die geplanten Aufgaben und Arbeitsschritte konkretisieren zu können, wurden zunächst alle Anforderungen an die Sensorik und Datengenerierung, die hard- und softwareseitigen Komponenten der Infrastruktur und an den Kommunikationsablauf zusammengetragen (AP1).

##### 3.1.1 VORGABEN UND DATENGENERIERUNG

Die Grundlage zur Datengenerierung an der Straße bilden zunächst die verkehrstechnischen Vorgaben. Soll ein System im öffentlichen Verkehrsraum genutzt werden, ist die Einhaltung dieser Anforderungen unumgänglich. Hierfür gilt das Dokument „Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen 2012“ (TLS 2012)<sup>2</sup> der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) als Basis. Für spezielle Anwendungsfälle können weitere Vorgaben hinzukommen.

Der erste wichtige Aspekt, der durch die TLS 2012 definiert wird, ist die Klassifizierung von Fahrzeugen. Hierbei werden u. a. die in Tabelle 1 und Tabelle 2 aufgeführten Einteilungen festgelegt, die je nach Einsatzgebiet auch für das hier zu entwickelnde Sensorsystem von Bedeutung sind.

---

<sup>2</sup> BASt (2013): Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen, Ausgabe 2012, Januar 2013, <http://www.bast.de>

**Tabelle 1:** Klassifizierung der TLS 2012 nach zwei Fahrzeugklassen<sup>2</sup>

Klasse	Kurzbezeichnung	Code	zugeordnete Grundklassen
Pkw-Ähnliche	PkwÄ	32	Nicht klassifizierbare Fahrzeuge (nk Kfz), Motorräder (Krad), Pkw, Lieferwagen bis 3,5t (Lfw)
Lkw-Ähnliche	LkwÄ	33	Pkw mit Anhänger (PkwA), Lkw, Lkw mit Anhänger (LkwA), Sattelkraftfahrzeuge (Sattel-Kfz), Busse

Tabelle 1 zeigt die Einteilung in zwei Fahrzeugklassen (LKW und PKW). Diese Klassifizierungsmethode wird bspw. für die Bilanzierung von freien Parkplätzen an Autobahnen eingesetzt, wo die Kenntnis über freie LKW-Parkplätze aufgrund der hohen Auslastung eine wertvolle Information für die Verkehrsteilnehmer, hier die Kraftfahrer, darstellt. Eine detailliertere Klassifizierung ist daher für diesen Anwendungsfall nicht vonnöten.

Tabelle 2 zeigt die Einteilung in fünf Fahrzeugklassen zuzüglich einer weiteren Klasse für nicht zuordnende Fahrzeuge. Diese „5+1“ genannte Methode stellt die Mindestanforderung für Verkehrserhebungen dar.

**Tabelle 2:** Fahrzeugklassifizierung 5+1 Fahrzeugklassen<sup>2</sup>

Klasse	Kurzbezeichnung	Code	zugeordnete Grundklassen
Pkw-Gruppe	PkwG	1	Motorräder, Pkw und Lieferwagen
Pkw mit Anhänger	PkwA	2	Pkw mit Anhänger
Lkw	Lkw	3	Lkw
Lkw (Fahrzeugkombinationen)	LkwK	4	Lkw mit Anhänger und Sattelkraftfahrzeuge
Busse	Bus	5	Busse
nicht klassifizierbare Fahrzeuge	nk Kfz	6	nicht klassifizierbare Kfz

Ziel des Projekts ist es, die Vorgaben der Parkplatzbilanzierung (zwei Fahrzeugklassen) mit der innovativen Sensorik zu erfüllen und dabei die Grundlage zu schaffen, diese dann auf die erweiterte Fahrzeugklassifizierung ausdehnen zu können.

Neben den allgemeinen Grundlagen werden zudem anwendungsspezifische Vorgaben durch die Bundesrepublik Deutschland an Verkehrstelematiksysteme gestellt. Für den Einsatz eines Telematiksystems zur Parkplatzbilanzierung existiert bspw. eine weitere Vorgabe<sup>3</sup>, die die Erfassungsgenauigkeit der Fahrzeuge bei einer Langzeitbetrachtung und in Sondersituationen im Messbereich definiert.

Neben den verkehrstechnischen Definitionen wurden durch die Projektpartner weitere Anforderungen festgelegt, die zu einem Erfolg des Projektes beitragen:

- Richtungs-, Geschwindigkeits- und Längenabschätzung von Fahrzeugen (teilw. auch Voraussetzung für eine Fahrzeugklassifizierung)
- Detektion von Fahrzeugen über mehrere Fahrspuren
- Fahrspurgenaue Erkennung
- Echtzeitfähigkeit des Systems

<sup>3</sup> Bewertungsverfahren der Zentralstelle für Verkehrsmanagement für LKW-Parkplatzbilanzierungssysteme, Zentrale für Verkehrsmanagement, Autobahndirektion Südbayern, Stand 2016-06-10

- Nutzung standardisierter Formate und Technologien für den Datenaustausch (DATEX II, REST)

Die Schnittstellen für den Datenaustausch werden in die Smart-Data-Plattform integriert und liegen somit im Aufgabenbereich des Partners FH Dortmund (siehe auch die Erläuterungen zur *Services*-Komponente der Plattform in Unterabschnitt 5.2. Hierbei ist eine detaillierte Abstimmung notwendig, damit die benötigten Informationen durch die straßenseitige Sensorik generiert werden können.

### 3.1.2 SENSORIK

Das Konzept der Nutzung von Funktechnologie, so genannter Radiotomographie, zur Detektion von Objekten innerhalb des aufgespannten Funkfeldes wurde aus dem Projekt „Falschfahrerwarnsystem“ (ZIM KF2144703DB0) abgeleitet. Ziel ist es, die Signalstärke der Funkverbindungen zwischen zwei Geräten zu messen und Einbrüche dieser Signalstärke durch Objekte, die die Funkverbindung durchqueren, zu detektieren. Für die Umsetzung, den aktuellen Anforderungen entsprechend, war jedoch eine von Grund auf komplexere Komponente in Hard- und Software zu entwickeln.

Für die Sensorentwicklung erfolgten zunächst diverse Vortests. Der Fokus lag dabei auf der Nutzung der innovativen Funktechnologie zur Detektion von Fahrzeugen. Die Anforderungen an das Leistungsspektrum dieser Module waren aufgrund der Vorgaben und Ziele, die mit dem Projektvorhaben verfolgt werden, jedoch extrem hoch. Daher erfolgte die Hardware-Evaluation (AP2) in verschiedenen Bereichen. Neben der eigentlichen Technologiekomponente für die Hochleistungs-Funk-Infrastruktur wurden auch weitere Sensoriken betrachtet, die ggf. die Genauigkeit der Funksensorik steigern oder zusätzliche Informationen zum Verkehrsfluss oder dem Objekt im Messsystem liefern können.

### FUNKMODULE

Diverse Funkmodule der neusten Generation wurden recherchiert. Die allgemeinen Kriterien wurden unter Berücksichtigung der Leistungsfähigkeit eines zu entwickelnden Systems, erlaubter Frequenzbereiche sowie den Witterungsbedingungen am späteren Installationsort zusammengestellt.

Die Kriterien der Untersuchung waren:

- Sendefrequenz und Reichweite
- Empfindlichkeit und Signalverstärkung
- Betriebsspannung und Energieverbrauch
- Prozessor und Speicher
- Schnittstellen (Ein- und Ausgänge)
- Programmierinterface
- Betriebstemperaturbereich

Zwei verschiedene Modultypen wurden aufgrund ihrer Charakteristika ausgewählt, um einer detaillierteren Analyse unterzogen zu werden. Es wurden Testmessungen (Abbildung 3) bzgl. Verbindungsstärke und dem Verhalten bei Objekten im Funkfeld (Signaleinbruch) durchgeführt. Hierzu wurden Daten zwischen zwei identischen Modulen gesendet und die Signalstärke gemessen. Durch die Erfahrungen im Bereich Funkmodule der Wilhelm Schröder GmbH und der TU Dortmund konnten Werte älterer Funkchips als Referenz hinzugezogen werden.



**Abbildung 3:** Testmessung mit zwei neuen Funkmodulen gleichen Typs über eine Straße

### 3.1.3 KOMMUNIKATION

Für die Kommunikation des Sensorsystems mit der Smart-Data-Plattform ist eine geeignete Machine-to-Machine-Lösung (M2M-Lösung) notwendig. Sie muss die folgenden Kriterien zur Integration in das Sensorsystem erfüllen:

- Schnelle Anbindung an das Sensorsystem
- Flexibilität in Bezug auf die Anpassbarkeit an die Datenformate des Sensorsystems
- Kosteneffizienz
- Hohe Übertragungsgeschwindigkeit (potenzielle Echtzeitfähigkeit der Datenerfassung und -übertragung)
- Etablierung von Sicherheitsstandards zur Gewährleistung der Datensicherheit

### TECHNOLOGIEAUSWAHL

Es wurde eine in der Praxis etablierte Kommunikationslösung in modularer Bauweise gewählt, die zum einen diesen Anforderungen der Sensor-Hardware genügt und zum andern den Vorgaben der zu entwickelnden Smart-Data-Plattform entspricht:

- Flexibilität in Bezug auf die Anpassbarkeit an die Datenformate der Plattform
- Konfigurierbarkeit der Datenübertragung (instantan oder intervallgesteuert)
- Datenschutz und Datensicherheit

Abbildung 4 zeigt das ausgewählte Mobilfunk-Modul des Herstellers CP contech electronic GmbH.



**Abbildung 4:** Mobilfunk-Modul der Firma contech mit GSM-Antenne



Neben der Erfüllung der Anforderungen der Sensorik und der Plattform verfügt das Modul über weitere Features, die sich im weiteren Projektverlauf positiv auf das entwickelte Gesamtsystem auswirken können:

- GSM-Mobilfunktechnologie (M2M-Kommunikation)
- Web-Interface zur individuellen Konfiguration des Moduls
- Automatisierte Anmeldung an der Smart-Data-Plattform bei Modulstart
- Kontinuierlicher Versand von Ping-Nachrichten mit Informationen über den Betriebszustand
- Notstromversorgung zum Versand von Fehlermeldungen

Durch die Kombination aus ausgewähltem Kommunikationsmodul, Smart-Data-Plattform und Sensorsystem wird auf Basis projektspezifischer Anpassungen an diesen Systemkomponenten ein fehlerfreier Betrieb der Kommunikation im Entwicklungsprozess sichergestellt. Zudem wurden, gemeinsam mit der TU Dortmund, weitere Untersuchungen durchgeführt, welche den Energieverbrauch des Kommunikationsmoduls festhalten (siehe Abschnitt 4.4), um eine Gesamtenergiebilanz des Sensorsystems erstellen zu können.

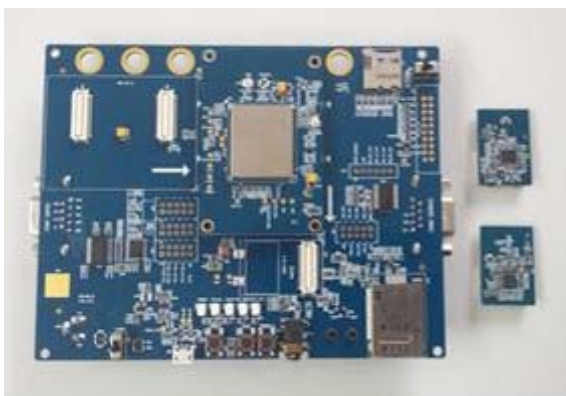
Nach Abschluss der ersten Tests mit dem Kommunikationsmodul wurde die Sensorik-Hardware den Anforderungen entsprechend angepasst und eine neue Leiterplatte designt und gefertigt, die die Schnittstellen zum Modul standardmäßig vorsieht (siehe Abschnitt 3.3 „Hardwareentwicklung und Testfelder“).

#### AUSBLICK AUF ZUKÜNFTIGE STANDARDS

Auch wenn die Nutzung des vorgestellten Moduls mit der M2M-Anbindung im GSM-Band für die gesamte Projektlaufzeit den bevorzugten Kommunikationsweg darstellt, wurden in der 2. Projekthälfte zukunftsorientierte Technologien betrachtet, welche künftig für die Weiterentwicklung des Gesamtsystems wegweisend sein können. So wurde der kommende Standard Narrowband-IoT (NB-IoT) erprobt, der als eine sogenannte Low Power Wide Area (LPWA) Technologie mit niedrigem Energiebedarf sowie hoher Reichweite eine kostengünstige Lösung für das schmalbandige Internet der Dinge darstellt.

##### Eigenschaften des NB-IoT:

- M2M-Kommunikation durch Mobilfunknetze für das Internet der Dinge
- Niedriger Energiebedarf und hohe Reichweite
- kleine Datenpakete und Echtzeitfähigkeit
- Nutzung von GSM und LTE-Netzen



**Abbildung 5:** NB-IoT Development-Modul

Einsatzbereiche des NB-IoT sollen dabei Smart Metering, Vernetzung von Straßenlaternen und Parkplätzen sowie die Logistik sein. Im September 2015 einigten sich die Mitglieder des 3GPP<sup>4</sup> auf grundlegende NB-IoT-Spezifikationen, sodass 2016 die Standardisierung der neuen Technologie durch das 3GPP abgeschlossen wurde. Eine Etablierung eines ersten Testbetriebs von Narrowband-IoT ist seitens der Provider für das 1. Quartal 2018 vorgesehen, daher wurden lediglich erste Tests mit einem Development-Modul im Projekt durchgeführt. Dieses wurde durch die Deutsche Telekom gemeinsam mit einer Test-SIM-Karte vor Markteinführung des NB-

<sup>4</sup> "The 3rd Generation Partnership Project (3GPP)" vereint mehrere Telekommunikations-Standard Entwicklungs Organisationen, <http://www.3gpp.org/>

IoT zur Verfügung gestellt. Kontakt zur Deutschen Telekom (und T-Systems) besteht bereits über die Vernetzung durch die Smart City Dortmund.

Nach Start des NB-IoT Testbetriebs 2018 wird dieser Ansatz detaillierter weiter verfolgt.

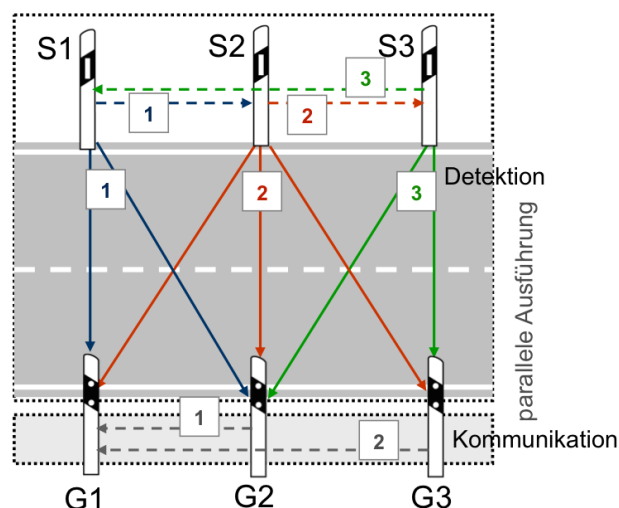
### 3.2 HARDWARE-BASIERTE SOFTWAREENTWICKLUNG

Der folgende Unterabschnitt beschreibt die Hard- und Softwareentwicklung im Kontext der ausgewählten Komponenten der straßenseitigen Infrastruktur für die Realisierung einer ersten Gesamtlösung. In der Entwicklung der Sensorik wurde sich auf die oben beschriebenen Funksensoren (Abschnitt 3.1.2) fokussiert (AP5). Der Vorteil dieses Sensors ist die einfache Handhabung und die Programmierung der Chips mittels einfach zu steuernder Werkzeuge. Der Befehlssatz, um das Kommunikationsmodul inkl. Mikrocontroller, internem Speicher und Funktransceiver zu programmieren, ist für das innovative Systemkonzept nutzbar.

Im folgenden Abschnitt wird zudem nicht nur der Aufbau der Sensorik und die Entwicklung des Algorithmus zur Objekt-Detektion beschrieben, sondern ebenso die Entwicklung weiterer Software-Werkzeuge dargestellt, die für einen reibungslosen Ablauf zur Initialisierung und Überwachung der Sensorik notwendig sind. Eine optimale Konfiguration des Gesamtsystems ermöglicht dadurch einen schnelleren Testablauf, eine bessere Interpretation der Ergebnisse und fördert die rekursive Überarbeitung (AP 9).

#### 3.2.1 SYSTEMARCHITEKTUR

Die Systemarchitektur der funkbasierten Hochleistungssensorik setzt aufgrund der Erfahrungen und Entwicklungen der Wilhelm Schröder GmbH und der Forschungspartner für die nächsten Schritte der Entwicklung auf einem bekannten Systemaufbau auf. Die neu entwickelten Sensoren wurden in sechs Leitpfosten integriert, jeweils drei auf einer Straßenseite, mit denen das **Funkfeld mit 7 Funkverbindungen aufgespannt** wird (Abbildung 6). Zur Unterscheidung werden die in der Kommunikation sendenden Geräte als „Sensoren“ S1, S2, S3 und die empfangenden Geräte als „Gateways“ G1, G2, G3 bezeichnet. Das Gateway G1 enthält zudem die Auswerteeinheit mit dem **Kern-Algorithmus zur Detektion** sowie die geplante Anbindung an das Mobilfunknetz.



**Abbildung 6:** Systemaufbau und Kommunikationsablauf im Funkfeld

Im Gateway G1, auch als „Master“ bezeichnet, wird zudem basierend auf den Ergebnissen der Simulation und der Entwicklungen der Mustererkennungsverfahren die Vorbereitung zur **Fahrzeugklassifizierung** umgesetzt. Ein so genannter „Ausgabe-Vektor“ des Masters, noch ohne Fahrzeugklasse,

enthält zunächst die Fahrtrichtung des Fahrzeugs, die aus der Reihenfolge der durch das Fahrzeug eingebrochenen Funkverbindungen (Verbindungsnummern 1-9) abgeleitet wird.

Um eine möglichst hohe Abtastrate des Funkfeldes und somit eine hohe zeitliche Auflösung zu erreichen, wurde anschließend das entwickelte Konzept der internen Systemkommunikation umgesetzt. Dazu wurde der Ablauf einer einzelnen Abtastung, wie geplant, mittels Parallelisierung auf drei Schritte reduziert (von 18 Schritten im Falschfahrersystem). Abbildung 6 zeigt den Kommunikationsablauf des entwickelten Systems.

Die höhere Komplexität der Kommunikation bedingt dabei eine Auslagerung verschiedener Rechenoperationen vom Master G1 auf die anderen Gateway-Pfosten G2 und G3. Dies bedeutet jedoch auch, dass nicht mehr alle Daten am Master vorliegen und somit zentral abgerufen werden können. Gerade in der weiteren Entwicklung und Optimierung des Algorithmus, auch im Hinblick auf die Mustererkennung und die Simulationen der TU Dortmund, wurde an dieser Stelle eine Möglichkeit geschaffen, alle Informationen in verschiedenen Messabschnitten des Testbetriebes zentral synchronisiert sammeln zu können (siehe Unterunterabschnitt 3.2.4).

### 3.2.2 REKURSIVE ALGORITHMUS-ENTWICKLUNG

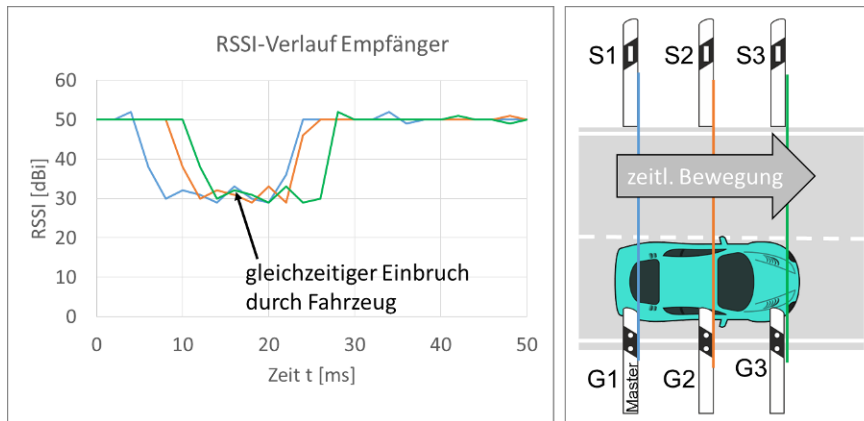
Die hier beschriebenen Entwicklungen der Methoden zur Objekt-Detektion und der zugehörige Algorithmus wurden parallel zur Hardware-Entwicklung durchgeführt (AP4 und 5). Die Ansätze der rekursiven Optimierung (AP9) fließen in die Beschreibung dieser Methodik mit ein. Zudem werden die Praxistests (AP8) auf den Versuchsfeldern im Abschnitt 3.3.2 beschrieben, der auch die Resultate der im Folgenden beschriebenen Detektionsverfahren genauer darstellt.

#### SZENARIOBEDINGTER ALGORITHMUS UND PERFORMANCE

Um die Performance unter beschränkten Ressourcen (AP6) weiter zu steigern, wurde im Hinblick auf die unterschiedlichen Einsatzbereiche der Sensorik von einer allgemeinen Software für alle Szenarios Abstand genommen. Der Algorithmus für die Detektion von Objekten im Funkfeld wurde individuell auf die äußeren Gegebenheiten des Einsatzszenarios angepasst, die Basisroutinen (vgl. Abschnitt 3.2.1) bleiben jedoch identisch.

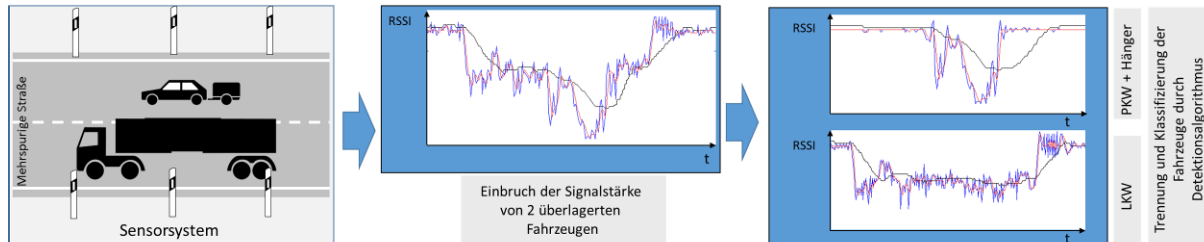
Große Unterschiede wurden dabei zwischen den Systemen in den Bereichen kommunales / gewerbliches Parken und Installationen an der Autobahn gemacht. Dies begründet sich durch die Installationslängen der Systeme, die an gewerblichen Parkplätzen bis auf 1m verkürzt werden kann, und der Möglichkeit, dass sich dort auch größere Personengruppen im Funkfeld aufhalten können und die Detektion beeinflussen.

Dem Algorithmus wurde für diese Szenarien ein weiteres Detektionsmerkmal hinzugefügt, sodass Fahrzeuge mit einer deutlich höheren Genauigkeit erkannt werden. Aufgrund der geringen Installationslänge des Systems von 1m verursachen durchquerende Fahrzeuge (Länge >1m) einen gleichzeitigen Einbruch aller Funkverbindungen für einen kurzen Zeitpunkt (Abbildung 7). Dieses wurde für das vorhandene Szenario als praktikabel bewertet. Ergebnisse dieses Algorithmus werden unter Abschnitt 3.3.2 präsentiert.



**Abbildung 7:** Links: Schematischer Aufbau mit Signalverlauf; Rechts: Fahrzeug im Detektionsbereich

Ein weiterer Aspekt für die Erhöhung der Detektionsgenauigkeit war die Erweiterung des Algorithmus zur Erkennung von sogenannten weiteren Signaleinbrüchen durch mehrere parallele Objekte. Dem Algorithmus wurde daher ein Modul hinzugefügt, das es ermöglicht, einen bereits eingebrochenen Signalpegel durch ein Objekt im Funkfeld genauer zu untersuchen und einen zweiten Einbruch zu erkennen und herauszufiltern (Abbildung 8). Eine zusätzliche Herausforderung war dabei, die Performance der Mikrocontroller nicht zu verlangsamen und die Sensoren als Kleinstgeräte mit beschränkten Ressourcen im Rahmen ihrer Leistungs- und Speichergrenzen optimal zu nutzen. Diese Arbeitsschritte bildeten somit einen Kernaspekt der AP 5 und 6.



**Abbildung 8:** Links: parallel durch das Sensorsystem fahrende Fahrzeuge; Mitte: RSSI-Signalverlauf; Rechts: Trennung der beiden Fahrzeuge durch Detektionsalgorithmus

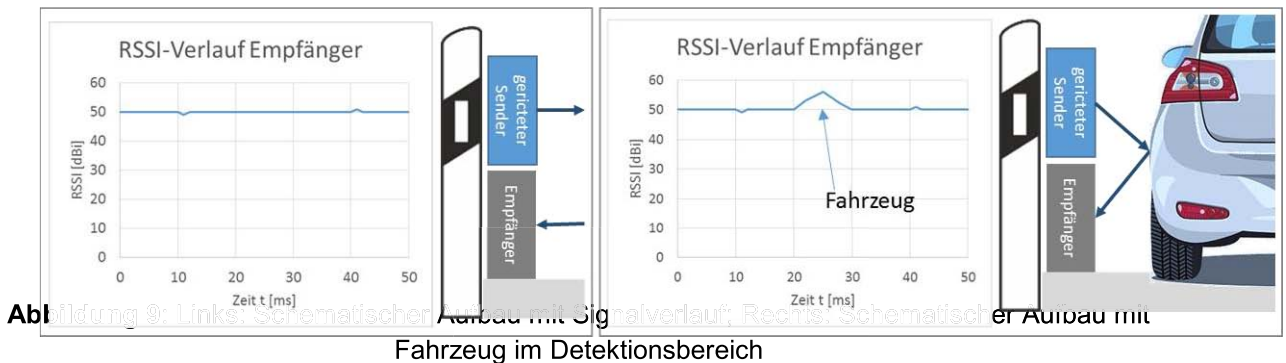
Neben der Durchführung der ersten Messungen mit Aufzeichnung der Signalpegel auf den Testfeldern wurde parallel am Detektionsalgorithmus und an der Hardware gearbeitet, um Störungen von außen zu minimieren und die Fahrzeugdetektion zu optimieren. Die rekursive Optimierung der Hardware (vgl. Abschnitt 3.3.1), speziell die Sendeleistungsoptimierung, wurde somit, wie auch die Softwaremodifikationen, iterativ an die Resultate der Testfelder angepasst und werden unter 3.3.2 „Testbetrieb und Ergebnisse“ beschrieben.

Um die Steigerung der Detektionsgenauigkeit, speziell für die Erfassung der Fahrzeuge auf mehrspurigen Straßen, weiter zu erhöhen, wurden zusätzliche Detektionsmerkmale erprobt.

#### FUNKREFLEXIONEN ALS DETEKTIONSMERKMAL

Ein weiterer Forschungsansatz zur Optimierung des Sensorsystems war die Erweiterung der Funktionalität der Funkfelddetektion. Gemeinsam mit der TU Dortmund wurde ein Konzept entwickelt und prototypisch umgesetzt, so dass neben den Einbrüchen der Signalstärke durch Objekte im Funkfeld auch die Reflexionen der Funkverbindung von metallischen Objekten als Detektionsmerkmal genutzt

werden können. In einem Leitpfosten wurden somit zwei Antennen zum Senden und Empfangen platziert (Abbildung 9 links). Wenn ein gut reflektierendes Objekt den näheren Bereich vor dem Pfosten durchquert, soll durch die Reflexion die Signalstärke am Empfänger erhöht werden (Abbildung 9 rechts).



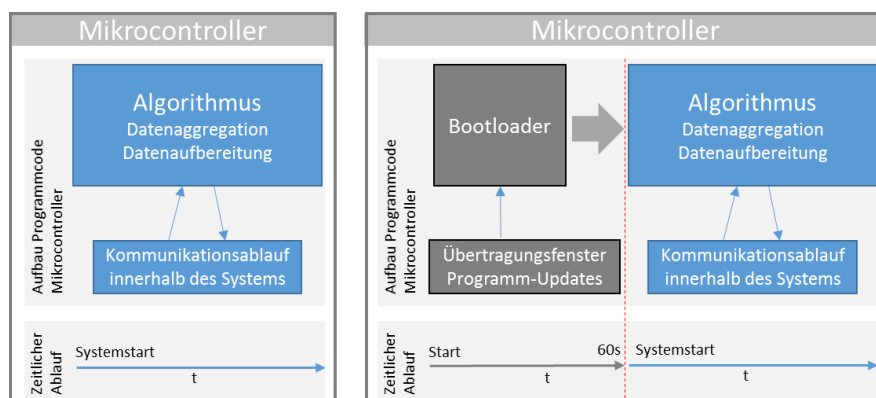
Ziel dieses Verfahrens war die Erhöhung der Detektionsgenauigkeit. Speziell wurde dabei auf den Aspekt der Mehrspurigkeit eingegangen, da eine erkennbare Überhöhung des Signalpegels im Test unter Laborbedingungen nur im näheren Bereich des Sensors registriert werden konnte. Diese Methode der Funkfeldsensork wurde daher auf den Testfeldern genauer betrachtet (Abschnitt 3.3.2).

#### REMOTE-PROGRAMMIERUNG DER FUNKCHIPS

Die Optimierung der Performance (AP6) wurde nicht nur im Bereich der Algorithmusentwicklung selbst betrachtet, sondern auch auf die Handhabe des gesamten Systems ausgedehnt. Effektivere Abläufe bei der Programmierung der Mikrocontroller vereinfachten den Testbetrieb innerhalb des F&E-Projekts und geben gleichzeitig einen Ausblick auf das spätere Produkt im Herstellungsprozess und bei Updates in Realbetrieb.

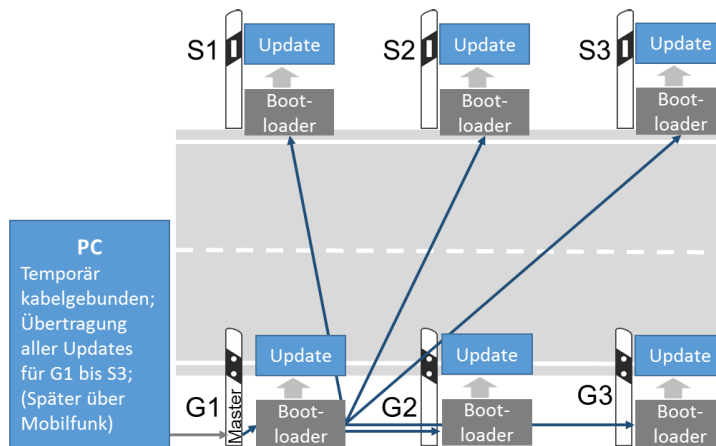
So wurde das Grundgerüst des Algorithmus neu entwickelt, um das Programmieren der Mikrocontroller per Fernzugriff zu ermöglichen. Um den eigentlichen Programmcode wurde ein sogenannter „Bootloader“ (Startprogramm) erstellt, der den weiteren Start des Mikrocontrollers mit der zugehörigen Software regelt.

Der Bootloader musste mehrere Eigenschaften erfüllen, um nicht nur einen geregelten Programmstart des Mikrocontrollers zu ermöglichen, sondern auch ein Programmieren über die Funkverbindung („Flashen Over-the-Air“) zu gewährleisten. Gleichzeitig bestand die Herausforderung darin, auf der Ressourcen-beschränkten Hardware die Funktionsweise des Algorithmus nicht negativ zu verändern oder zu verlangsamen. Daher wurde das Konzept gewählt, in den Ablauf des Algorithmus nicht einzugreifen, sondern bei Inbetriebnahme der Mikrocontroller durch den Bootloader ein Zeitfenster von 60 Sekunden bereitzustellen, in dem ein Softwareupdate angestoßen werden kann (Abbildung 10).



**Abbildung 10:** Links: alter Aufbau Software; Rechts: neuer Aufbau Software mit Bootloader

Die Bootloader wurden dabei individuell auf die unterschiedlichen Funktionen innerhalb eines Systems (Master, Gateway, Sensor, vgl. Abschnitt 3.1.2) angepasst. Hierdurch wird ermöglicht, dass vom Master eines Systems der neue Programmcode an alle Mikrocontroller im System übertragen werden kann. Dabei wird vorher gezielt jeder Mikrocontroller über seine Adresse und die zugehörige Codevariante ausgewählt (Abbildung 11).

**Abbildung 11:** Kommunikationsablauf bei Software-Updates am Sensorik-System

Um dieses Konzept der Remote-Programmierung umsetzen zu können, musste ein individueller Flash-Programmer<sup>5</sup> am PC entwickelt werden, der im ersten Schritt die neu konzipierte Sensorsoftware (Bootloader und dann Programmcode) an die Funkchips übertragen kann und im zweiten Schritt die Vorteile des neuen Bootloaders ausnutzt (Aktualisierung des Programmcodes Over-The-Air).

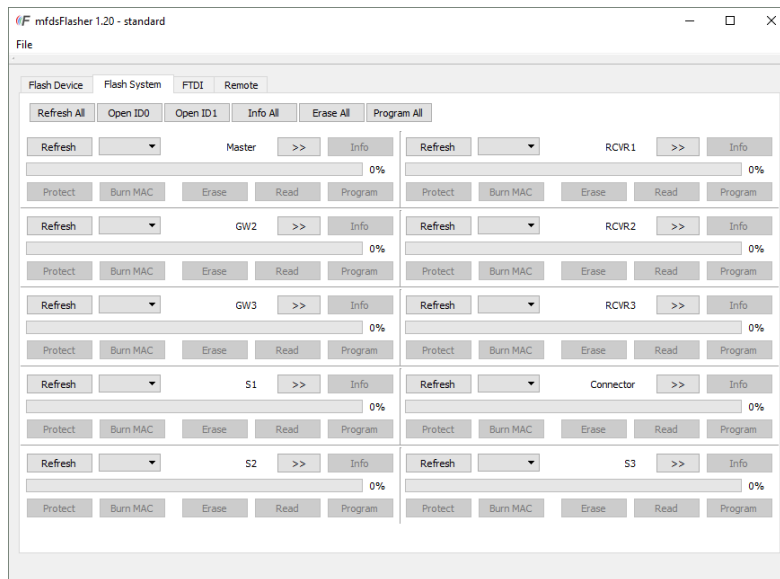
### 3.2.3 REMOTE-PROGRAMMER

Die unterschiedlichen, bis dato genutzten Flash-Programmer zum kabelgebundenen Übertragen von Programmcode vom PC zum Mikrocontroller des Sensors waren standardmäßig verfügbare Lösungen, jedoch auf den im F&E-Projekt genutzten Funkchip angepasst. Die Aufgaben dieser Software-Werkzeuge sind dabei das Löschen des alten Programmcodes und Übertragen des neuen Programmcodes in den dafür vorgesehenen Speicherbereich des Mikrocontrollers (vgl. Abbildung 10 links: Programmcode).

Der entwickelte Programmer muss in der Lage sein, den Bootloader in Schritt 1 (ID0) zu übertragen und in Schritt 2 (ID1) die eigentliche Applikation. Dieser muss bei einem Update ausgetauscht werden können (Schritt 2, ID1) ohne den Bootloader zu verändern. Neben dieser generellen Funktionalität wurden zudem weitere Eigenschaften in den Programmer integriert, die den Umgang mit der Sensorik vereinfachen (Abbildung 12). Eine Übersicht über die Funktionen wird im Folgenden gegeben:

<sup>5</sup> Flash-Programmer: Software-Werkzeug zum Übertragen des Programmcodes vom PC zum Mikrocontroller





**Abbildung 12:** Programmoberfläche des Flash-Programmers

#### FLASH DEVICE

Unter dem Reiter „Flash Device“ kann die Verbindung zu einem angeschlossenen Sensor hergestellt werden. Die Quellcodes für den Bootloader (ID0) und den Algorithmus (ID1) können separat ausgewählt und übertragen werden.

#### FLASH SYSTEM

Gleiche Funktionalität wie der Reiter „Flash Device“, jedoch können hier alle Gateways (G1-G3) und alle Sensoren (S1-S3) eines Systems gleichzeitig programmiert werden (Abbildung 12), was ein System-Update deutlich vereinfacht.

#### FTDI

Der Reiter FTDI steht für den Chip FTX230 der Firma „Future Technology Devices International“. Dieser Chip stellt die Schnittstelle zwischen dem Funkchip mit dem Mikrocontroller und Micro-USB-Stecker als Programmierinterface dar. Der FTDI setzt somit die Signale vom Mikrocontroller in Signale des USB-Standards um und umgekehrt. Er muss vor der ersten Nutzung der Hardware einmalig eingestellt werden, um genau die Anforderungen des Funkchips zu erfüllen. Diese Einstellungen können somit auch mit dem Remote-Programmer vorgenommen werden.

#### REMOTE

Der Reiter „Remote“ steuert die Programmierung aller angeschlossenen Geräte Over-The-Air (vgl. Abbildung 11). Alle vorherigen Reiter zum Programmieren setzen einen direkten Anschluss per USB-Kabel am PC voraus.

### 3.2.4 DATENAUFBEREITUNG UND –ANALYSE

Um verschiedene Aspekte der Entwicklung, Analyse und Optimierung der Sensoren, speziell Software und Algorithmus betreffend, möglichst schnell realisieren zu können, wurde ein eigenes Programm konzipiert und umgesetzt. Dieser so genannte „Daten-Manager“ wird direkt an das Sensorsystem angebunden und verfügt über verschiedene Funktionen zur Datenaufzeichnung und –bereitstellung.

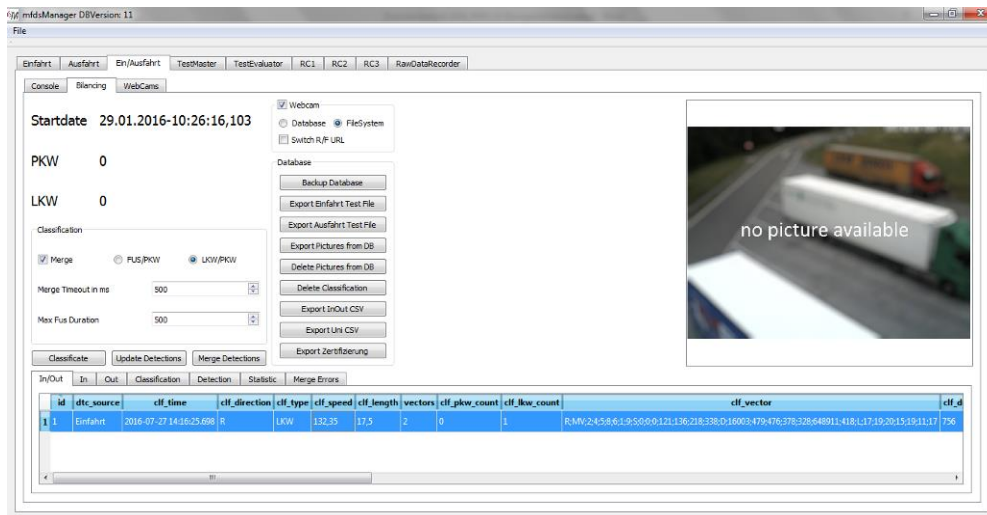


Abbildung 13: Datenbank-Oberfläche des „Daten-Managers“

Abbildung 13 zeigt die Datenaufzeichnung eines angeschlossenen Sensorsystems mit Speicherung in einer Datenbank. Ausgegeben werden die detektierten Fahrzeuge im Messbereich mit den Attributen Zeitstempel, Fahrtrichtung, Geschwindigkeit, Fahrzeuglänge, Fahrzeugklasse und diverse entwicklungs-basierte Zusatzinformationen. Bei einer angeschlossenen Kamera als Referenzsystem werden automatisch Bilder vom Zeitpunkt der Detektion aus dem Messbereich hinzugefügt. Somit ist eine einfache Auswertung der Daten bzgl. der Korrektheit möglich. Darüber hinaus ist in der Oberfläche die Möglichkeit des Datenexports gegeben.

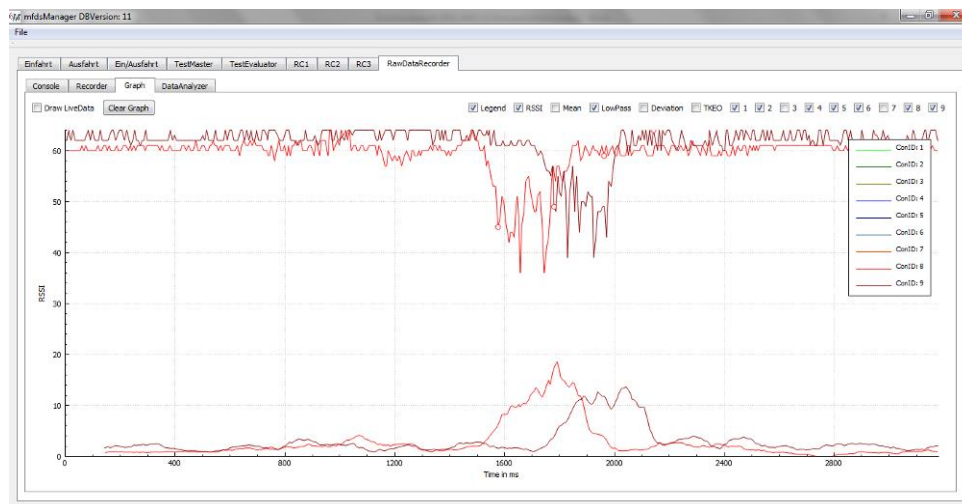


Abbildung 14: Funkfeld-Analyse des „Daten-Managers“

Abbildung 14 zeigt die Visualisierung der Signalstärke „RSSI“ zweier Verbindungen des Funkfelds über die Zeit. Diese ist aus den Rohdaten des Systems zu generieren. Die Rohdaten fallen dabei an den Gateways G1, G2, G3 an und gehören somit zu den zu synchronisierenden Daten (vgl. Unterunterabschnitt 3.2.1). Diese Funktion wird hierbei vom Daten-Manager übernommen, wodurch es möglich wird, den gesamten Systemablauf aufzuzeichnen und zu analysieren sowie die Effizienz der optimierten Systemarchitektur inkl. des komplexen Kommunikationsablaufs zu belegen.

Abbildung 15 zeigt auf der linken Seite einen Auszug aus den Daten des alten Systems, welche vollständig am Master G1 vorlagen. Von den angezeigten Werten sind dabei der erste Wert (Verbindungsnummer 1-9) und der letzte Wert (Timestamp (ms)) von Bedeutung. Der gelb hervorgehobene Bereich markiert einen Durchlauf aller Verbindungen, die von Verbindung 1 bis zum nächsten Wert dieser Verbindung eine Gesamtzeit von 64ms aufweisen.



G1	G1	G2	G3
8;0;0;57;55;113482	1325;1;64	1325;6;53	1325;9;60
9;0;0;55;54;113489	1327;2;59	1327;4;67	1327;7;61
1;0;0;60;58;113503	1329;3;54	1330;5;68	1330;8;64
2;0;0;64;58;113507	1331;1;65	1333;6;53	1333;9;60
4;0;0;61;57;113521	1333;2;59	1336;4;67	1335;7;61
5;0;0;64;62;113525	1334;3;54	1338;5;69	1338;8;64
6;0;0;62;58;113531	1337;1;64	1340;6;53	1340;9;60
8;0;0;57;56;113548	1341;2;59	1342;4;67	1341;7;61
9;0;0;56;53;113553	1343;3;54	1344;5;68	1343;8;64
1;0;0;61;57;113567	1345;1;64	1345;6;53	1345;9;60

**Abbildung 15:** Links: zeitl. Kommunikationsablauf vorheriges System (64ms);  
rechts: zeitl. Kommunikationsablauf neues System (7ms)

Der rechte Teil der Abbildung zeigt den Kommunikationsablauf des neuen Systems, bei dem G1 bis G3 parallel betrachtet werden müssen. Der erste Wert jeder Spalte ist hierbei der Timestamp (ms), der zweite Wert die Verbindungsnummer. Ein Systemdurchlauf (gelb markierter Bereich) ist nun in ca. 7ms realisierbar.

Die erwartete Steigerung der Abtastrate (Reduzierung von 18 Kommunikationsschritten auf drei, d. h. um den Faktor sechs) wurde somit durch die weiteren Optimierungen der Sensor-Software und des Algorithmus der Hochleistungssensorik übertroffen (Faktor neun).

Um die Sensorarchitektur umsetzen zu können, waren jedoch nicht nur innovative Entwicklungen im Bereich der Sensorsoftware notwendig, sondern auch eine Neuentwicklung der Hardware basierend auf den Analysen der Hardware-Evaluation (siehe Unterunterabschnitt 3.1.2). Um parallele Operationen des Kommunikationsablaufs durchführen zu können, mussten zwei Funkchips miteinander verschaltet werden. Der Aufbau der Hardware ist in Unterabschnitt 3.3 beschrieben.

### 3.3 HARDWAREENTWICKLUNG UND TESTFELDER

Den aktuellen Anforderungen entsprechend (siehe Unterunterabschnitt 3.1.2), wurde mit den ausgewählten Komponenten eine Sensorik entworfen, die einfach an verschiedene Testszenarien anzupassen ist. Die Hardware-Komponenten wurden schaltungstechnisch entworfen, designt und angefertigt (AP4, AP7). Ihren Aufbau zeigt Abbildung 16.



**Abbildung 16:** Erste Iteration der funkbasierten Sensor-Hardware

Das gezeigte Board verfügt über zwei Funkchips, die auf der Platine miteinander verbunden sind und Informationen austauschen können. Beide Chips können von extern per USB über die zugehörige

Schaltung (vgl. Abschnitt 3.2.3, „FTDI“) angesprochen werden. Eine Bestückung mit nur einem Funkchip für Module mit geringerem Funktionsumfang und geringerem Energiebedarf ist möglich. Zudem ist ein Ausgang zur Steuerung von LEDs vorhanden (für LEDs mit verschiedenen Versorgungsspannungen) ebenso wie eine SD-Karte (auf der Rückseite), auf der Daten protokolliert werden können. Ein Anschluss für das Kommunikationsmodul (siehe Unterunterabschnitt 3.1.3), über das Daten an die Smart-Data-Plattform gesendet werden können, ist bereits vorhanden (nur für den Master-Leitpfosten eines Systems vorgesehen). Erste Verbindungstests mit dem Modul waren erfolgreich. Die Energieversorgung kann über 230V (per Trafo) oder per Energiespeicher (6V-24V) erfolgen, wozu aktuell neben der Ermittlung der Leistungsstärke der Ressourcen-beschränkten Kleinstgeräte auch der Energiebedarf ermittelt wird, um Varianten des Energy Harvestings der Energiebilanz entsprechend zu ermöglichen (AP6). Als Gehäuse für die Hardware stehen zwei Varianten zur Verfügung: ein Zukaufteil sowie eine angepasste Komponente der Wilhelm Schröder GmbH.

Die funkbasierte Sensor-Hardware wird dem Systemkonzept entsprechend in die Leitpfosten integriert und bildet das Sensor-Messsystem in der ersten Iteration. Um einen ersten Anwendungsfall abzudecken, wurde die Systemarchitektur zur Parkplatzbilanzierung entwickelt. Eine Gesamtübersicht zeigt Abbildung 17. Hierbei werden alle Zufahrten zum Parkplatz mit einem Sensorsystem ausgestattet (ggf. Ein- und Ausfahrt). Diese Systeme können eigenständig per Mobilfunk ihre Daten zur Smart-Data-Plattform übertragen, die die Daten verarbeitet, den Parkplatz bilanziert und die Informationen zur Verfügung stellt (siehe auch Abschnitt 5). Optional kann auch eine Recheneinheit am Parkplatz positioniert werden, die die Daten der Systeme auch über andere Kommunikationstechnologien (WLAN, systemeigene Kommunikation etc.) in Empfang nimmt und die Informationen zur Smart-Data-Plattform weiterleitet. In den ersten Testaufbauten werden die Kommunikation und Datenübertragung je nach Einsatzort variieren ebenso wie die Energieversorgung durch permanente 230V AC-Anbindung, 12V DC-Anbindung oder 6V-Akku-Betrieb (vgl. Abschnitt 3.3.2 „Testbetrieb und Ergebnisse“).

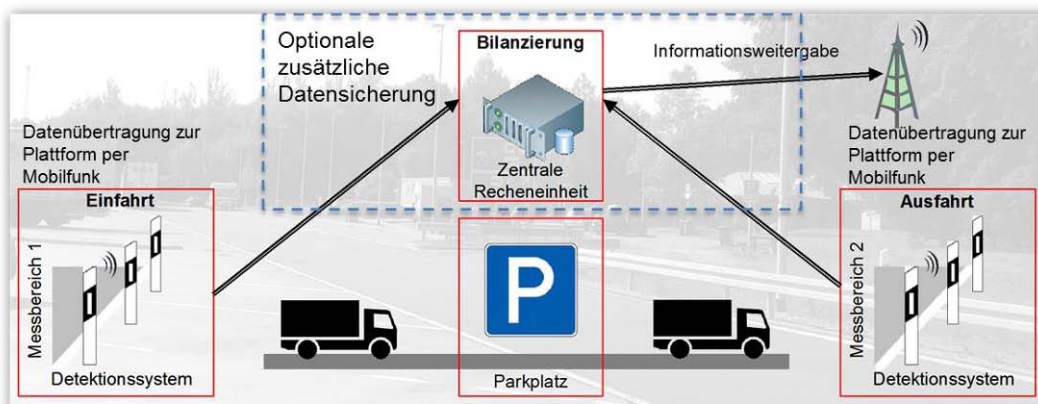


Abbildung 17: Systemübersicht Parkplatzbilanzierung

### 3.3.1 REKURSIVE OPTIMIERUNG DER HARDWARE

Die im Folgenden beschriebenen Schritte der Entwicklung der Sensorik wurden über die gesamte Projektlaufzeit durchgeführt. Wie im Arbeitsplan beschrieben, erfolgte die Optimierung der Hardware parallel zum Testbetrieb auf den Test- und Pilotfeldern, und basiert auf den erzielten Resultaten. Die einzelnen Schritte der Hardware-Entwicklung werden in diesem Abschnitt dargelegt. Der Aufbau der Testfelder mit dem Systembetrieb und die erzielten Ergebnisse werden in Abschnitt 3.3.2 beschrieben.

## DESIGN UND FUNKTIONALITÄT

Die Systemarchitektur (vgl. Abschnitt 3.2.1) sieht zunächst eine Integration des Sensorsystems in Leitpfosten am Straßenrand vor. Diese Vorgehensweise ist für die Einsatzbereiche an Autobahnen oder größeren Straßen vorgesehen. Angeregt durch die Testinstallation an den Dortmunder Westfalenhallen (vgl. Abschnitt 3.3.2) und Kontakte zu weiteren potenziellen Interessenten musste jedoch ein neutrales Design entwickelt werden, das im privaten oder kommunalen Bereichen u.a. für den Anwendungsfall „Parken“ zum Einsatz kommen kann. Als Voraussetzung ist hierbei zu beachten, dass der Straßenverkehr nicht beeinträchtigt werden darf.

Gewählt wurden daher sogenannte Design-Poller, die zur Absperrung in Verkehrsbereichen genutzt werden (Abbildung 18 links). Diese Poller bestehen aus einem Recycling-Kunststoff, wodurch die Funktionalität der Sensorik nicht beeinträchtigt wird. Zudem bietet das Hohlprofil Platz zur Integration der Sensorik.

Zudem wurde von potenziellen Kunden eine Funktion gewünscht, die Belegung des Parkplatzes direkt an der Zufahrt zum Parkplatz abzubilden. Als eine smarte, integrierte Lösung wurde dabei ein LED-Leuchtkranz realisiert, der mittels PWM-Signal in RGB-Farben angesteuert werden kann (grün – frei, rot – belegt) (Abbildung 18 rechts). Eine entsprechende Schnittstelle wurde auf der Elektronikplatine dahingehend angepasst, sowie die Ansteuerung in die Software des Sensorsystems eingebettet.

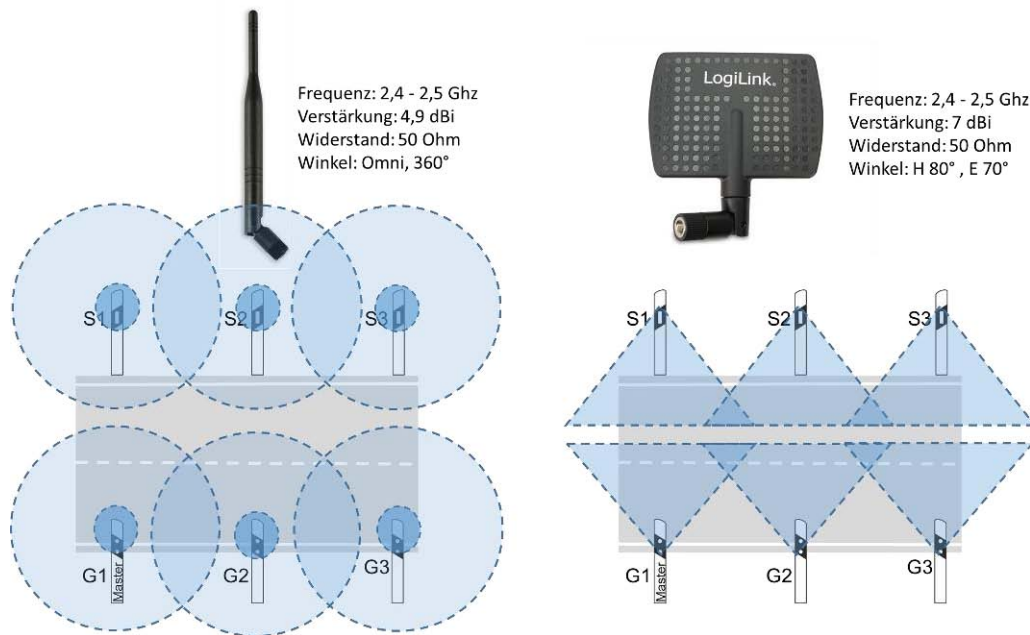


**Abbildung 18:** Kunststoff-Poller als neutrale Sensorikhülle; Links: Installiert mit Kunststoffteller; Mitte und Rechts: Entwicklungsstufen der integrierten LED

## ANTENNENDESIGN UND SENDELEISTUNGSOPTIMIERUNG

Ein guter Empfang der Funksignale innerhalb des Systems ist eine Grundvoraussetzung für den Betrieb dieser Sensortechnologie. Um Objekte im Funkfeld bestmöglich detektieren zu können, wird in diesem Abschnitt die Optimierung des Antennendesigns und der Sendeleistung beschrieben.

Im Sensoriksystem wurden zunächst einfache Rundstrahler genutzt, die kugelförmig in jede Richtung gleich effektiv senden und empfangen (Abbildung 19 links oben). Jedoch wurde durch verschiedene Testszenarien (siehe Abschnitt „Testbetrieb und Ergebnisse“) belegt, dass Reflexionen und Störungen von außerhalb des Detektionsbereiches Einfluss auf die Signalstärke und die Messwerte haben. In Abbildung 19 links ist schematisch dargestellt, dass auch Objekte hinter dem Detektionssystem von den Funkfeld-Sensoren erfasst werden können. Daher wurde mit Unterstützung der TU Dortmund eine andere Antennenkonfiguration gewählt, die den Fokus nur auf den Messbereich richtet. Die sogenannten Sektorantennen lenken das Funkfeld auf einen definierten Bereich mit einem festen Öffnungswinkel (Abbildung 19 rechts).



**Abbildung 19:** Schematische Darstellung der Funkfelder; Links: Rundstrahler im Sensoriksystem; Rechts: Sektorantennen im Sensoriksystem

Bei der Wahl der Antennen wurden zudem weitere Parameter, wie Verstärkung/Antennengewinn, einbezogen, da im freien 2,4Ghz ISM-Band eine Sendeleistungsbeschränkung von 10mW (=10dBi) (für die eingesetzte Funktechnologie) besteht. Tabelle 3 zeigt die Eigenschaften des verwendeten Chips und die möglichen Sendelevel.

**Tabelle 3: Power Level Mappings für die verschiedenen Versionen des Funkchips<sup>6</sup>**

Funkmodul	JN-5168-M00	JN-5168-M05	JN-5168-M06
Power Level Mode 0 (dBm)	-32	-26	-11
Power Level Mode 1 (dBm)	-20	-15	+1
Power Level Mode 2 (dBm)	-9	-3	+13
Power Level Mode 3 (dBm)	0	+9,5	+22

Die im Projekt verwendete Variante des Funkchips M00 erlaubt somit die aktuelle Antennenverstärkung von +7dBi (vgl. Abbildung 19) bei 0dBm (1mW) Sendeleistung. Der Chip M05 ist in Europa mit einem maximalen Sendelevel von +9,5dBi ebenfalls erlaubt, jedoch muss bei der Wahl der Antenne eine geringe Verstärkung gewählt werden. Der Funkchip M06 ist in Europa nicht zulässig.

## AUFBAU SENSOR UND TRÄGERSYSTEM

Weitere Iterationen der Optimierung des Sensorsystems zur Steigerung der Funkfeldqualität und dadurch der Detektionsgüte (AP9) wurden auch auf den gesamten Aufbau der Sensorik bezogen. Um die Störungsquellen der Funksignale weiter zu minimieren, wurden die Halterungen der Elektronik in den Leitpfosten und Pollern neu konzipiert und gefertigt. Die metallischen Trägersysteme wurden durch Kunststoff-Varianten ersetzt, welche das Funkfeld deutlich weniger beeinflussen.

<sup>6</sup> NXP Laboratories, Dokumenten-Nr. JN-UG-3024 v2.6, Seite 72





**Abbildung 20:** Kunststoffträgersystem mit Antennenhalterung und -fixierung

In diesem Zuge wurden weitere Halterungen konstruiert und prototypisch aufgebaut, die zum einen das Elektronikgehäuse tragen können und zum anderen eine Option zur Montage der Antennen bieten. Um die Sektorantennen ideal auf den Detektionsbereich ausrichten zu können (vgl. Abbildung 19 rechts), wurde ein Bügel zur Fixierung der Antennen entwickelt (Abbildung 20 rechts oben).

### 3.3.2 TESTBETRIEB UND ERGEBNISSE

Über das gesamte F&E-Projekt wurden verschiedene Testfelder (AP8) genutzt, um den aktuellen Stand der Entwicklung des Systems unter unterschiedlichen Bedingungen zu eruieren. Dieser Testbetrieb wurde im 2. Projektjahr ausgedehnt, um mit einer breiten Datenbasis die weiteren Entwicklungsschritte (AP9) des Systems durchführen zu können. Die verschiedenen Szenarien des gesamten F&E-Projekts mit ihren charakteristischen Eigenschaften werden im Folgenden kurz dargelegt.

#### TESTPARKPLATZ GELBELSEE

Der Testparkplatz Gelbelsee befindet sich an der A9 zwischen Nürnberg und München und liegt somit im „Digitalen Testfeld Autobahn“ der Bundesrepublik Deutschland<sup>7</sup>. Dieser Parkplatz ist von Seiten des Bundes für die Erprobung neuer Systeme und deren Zertifizierung vorgesehen. Durch die speziell vorhandene Ausstattung des Parkplatzes mit WLAN und Kameraüberwachung für den Testbetrieb wird eine einfache Auswertung der Ergebnisse per Kamerabild als Referenz ermöglicht.

Ein Testsystem gemäß der oben gezeigten Architektur wurde installiert und ein Fernzugriff auf den zum System zugehörigen Parkplatz-Server ermöglicht.

---

<sup>7</sup> BMVI: Digitales Testfeld Autobahn, [http://www.bmvi.de/DE/DigitalesUndRaumentwicklung/DigitalUndMobil/DigitalesTestfeldAutobahn/digitales-testfeld-autobahn\\_node.html](http://www.bmvi.de/DE/DigitalesUndRaumentwicklung/DigitalUndMobil/DigitalesTestfeldAutobahn/digitales-testfeld-autobahn_node.html), Stand 08.2016



**Abbildung 21:** Links: schematischer Aufbau des Systems „Einfahrt“; rechts: in die Leitpfosten integriertes System „Einfahrt“ mit Mast zur Kontrollfunktion (parkplatzeigene Ausstattung)

Eigenschaften Testfeld Gelbelsee	
Standort	A9 – Gelbelsee, Bayern, FR München
Systeminstallation	permanent
Länge der Messbereiche	10m
Anzahl Detektionsbereiche	2 – Einfahrt, Ausfahrt
Energieversorgung	230V AC - permanent
Datenaufzeichnung	Mini-PC pro System
Systemzugriff	Fernzugriff per Mini-PC (über Mobilfunkanbindung)
Systemüberwachung	Kameraüberwachung mit Aufzeichnung (Anbindung an Mini-PC)

## ERGEBNISSE TESTPARKPLATZ GELBELSEE

Das Ziel war hier zunächst die Datengenerierung und –auswertung sowie die Analyse von Fehlerfällen (siehe Abschnitt „Datenaufbereitung und –Analyse“ 3.2.4). Der entwickelte Daten-Manager konnte mit der Parkplatz-eigenen Ausstattung verknüpft werden, sodass zu jeder Fahrzeugdetektion an Ein- und Ausfahrt ein entsprechendes Foto über die Kameras des Parkplatzes angefordert und mit dem Datensatz abgelegt wurde. Dies ermöglicht eine manuelle Auswertung aller vorkommenden Situationen. Ebenso wurden der TU Dortmund die erfassten Rohdaten für weitere Simulationen zur Verfügung gestellt (siehe Abschnitt 4.1.3).

Um kleinere Anpassungen am Systemaufbau und so eine rekursive Weiterentwicklung der Sensorik schnell voranzutreiben, stellte jedoch die große Distanz der Konsortialpartner zum Testfeld eine Herausforderung dar. Aufgrund der sich in der Projektlaufzeit ergebenden Möglichkeiten hinsichtlich weiterer Testfelder wurde die permanente Weiterentwicklung daher an anderen Testfeldern vorangetrieben und in regelmäßigen Abständen zum Testparkplatz Gelbelsee gespiegelt. Mit dem Parkplatz Gelbelsee wurde somit eine Langzeitbetrachtung der Entwicklung, speziell des Detektionsalgorithmus, vorgenommen.

## PARKPLATZ BÖNEN

Durch die Unterstützung des nordrhein-westfälischen Landesbetriebs „Straßen.NRW“ konnte ein weiterer Testparkplatz ausgestattet werden. Dieser ist durch seine Lage an der A2 nahe Hamm vom Entwicklungsbüro der Wilhelm Schröder GmbH in Dortmund schneller zu erreichen. Hieraus ergibt sich die Option, Änderungen der Hardware zeitnah zu testen und Messreihen vor Ort durchzuführen, was in Gelbeseer aufgrund der hohen Entfernung in diesem Maße nicht möglich war.



Abbildung 22: System „Einfahrt“ in Bönen

Eigenschaften Testparkplatz Bönen	
Standort	A2 – Bönen, NRW, FR Hannover
Systeminstallation	permanent
Länge der Messbereiche	10m
Anzahl Detektionsbereiche	2 – Einfahrt, Ausfahrt
Energieversorgung	Akku-Betrieb
Datenaufzeichnung	Systemintern (SD-Karte)
Systemzugriff	manuell
Systemüberwachung	Stichprobenartig vor Ort

## ERGEBNISSE TESTPARKPLATZ BÖNEN

Die Testinstallation in Bönen war aufgrund der Voraussetzungen am Parkplatz deutlich einfacher gestaltet. Eine Möglichkeit zur Anbindung der Systeme an das Mobilfunknetz und ein damit möglicher Fernzugriff existierten nicht, da bauliche Voraussetzungen nicht gegeben sind. Das stellte jedoch gleichzeitig die Option dar, eine weitere Systemvariante mit Akku-Betrieb und interner Datenaufzeichnung zu evaluieren. In den Messzeiträumen wurden die Daten der Systeme regelmäßig eingesammelt und ausgewertet sowie die leeren Akkus der Systeme gegen volle ausgetauscht. Eine Überprüfung



Abbildung 23: Datenaufzeichnung vor Ort

der aufgezeichneten Ergebnisse fand stichprobenartig vor Ort statt.

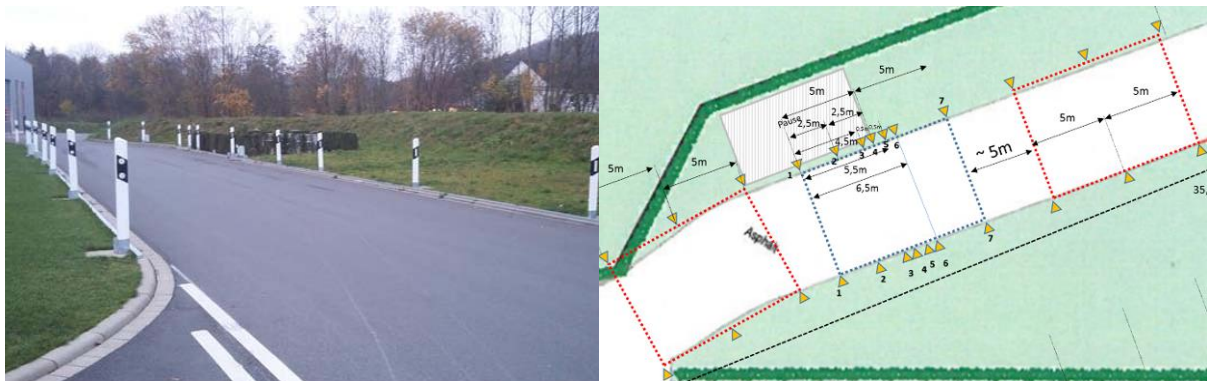
Zudem konnten zwei Aspekte am Parkplatz Bönen umgesetzt werden. Zum einen wurde eine Referenz geschaffen, gegen die das System in Gelbeseer geprüft werden kann. Dadurch wurde ausgeschlossen, dass das System an eine spezielle Umgebung angepasst wird und eine Übertragung an einen anderen Installationsort deutlich schlechtere Ergebnisse liefert. Das System in Hard- und Software soll bei allen späteren Installationen gleich gute Resultate liefern. Zum zweiten konnten vor Ort, gemeinsam

mit der TU Dortmund, weitere Rohdaten ergänzend zu denen vom Testparkplatz Gelbeseer erzeugt werden (Abbildung 23). Dadurch konnte die Datenbasis für weitere Simulationen des Algorithmus am PC deutlich gesteigert werden.



## TESTFELD WILHELM SCHRÖDER GMBH

Die Darstellung komplexer Fahrsituationen unter Laborbedingungen ist eine wichtige Komponente in der effektiven Entwicklung des Gesamtsystems. Um hochgenaue Resultate zu erreichen, müssen die Umgebung sowie die Eigenschaften der Fahrzeuge, welche den Messbereich durchqueren, im Vorfeld bekannt sein. Dadurch können die Messresultate schneller aufgezeichnet und evaluiert werden. Ebenso sind schwierige Szenarien, wie die Detektion von Fahrzeugen auf mehrspurigen Straßen, unter Laborbedingungen zunächst einfacher darzustellen. Aus diesem Grund wurde auf dem Werksgelände der Wilhelm Schröder GmbH eine Testumgebung geschaffen, welche die Möglichkeit der Datenaufzeichnung für vorgegebene Verkehrssituationen bietet und ebenso einen schnellen Eingriff in die Hard- und Software der Sensorik erlaubt (Abbildung 24). Die rekursive Überarbeitung des Systems (AP9) konnte hierdurch beschleunigt werden.



**Abbildung 24:** Links: Aufbau des Testfelds Wilhelm Schröder GmbH; rechts: Planung des Testfelds

Das so entstandene Testfeld teilt sich dabei in drei aufeinanderfolgende Bereiche auf, die in Testsituationen unterschiedlich genutzt werden können.

Während die Bereiche 1 und 3 hauptsächlich für einen Langzeittest ausgelegt sind, kann der Bereich 2 auch zur Evaluierung von Varianten des Systemaufbaus genutzt werden (Abbildung 25). Die Installationslänge kann hier zwischen 10m und 1m variiert werden, was bedingt durch die unterschiedlichen Einsatzszenarios eine sinnvolle Option darstellt. Eine entsprechende Testumgebung ermöglicht eine detaillierte Untersuchung des Systems, um die Systemparameter der Software entsprechend so konfigurieren zu können, dass das Systemverhalten bei unterschiedlichen Installationslängen identisch ist.



**Abbildung 25:** Bereiche 1, 2 und 3 auf dem Testfeld Wilhelm Schröder GmbH in Herscheid (v.l.n.r.)

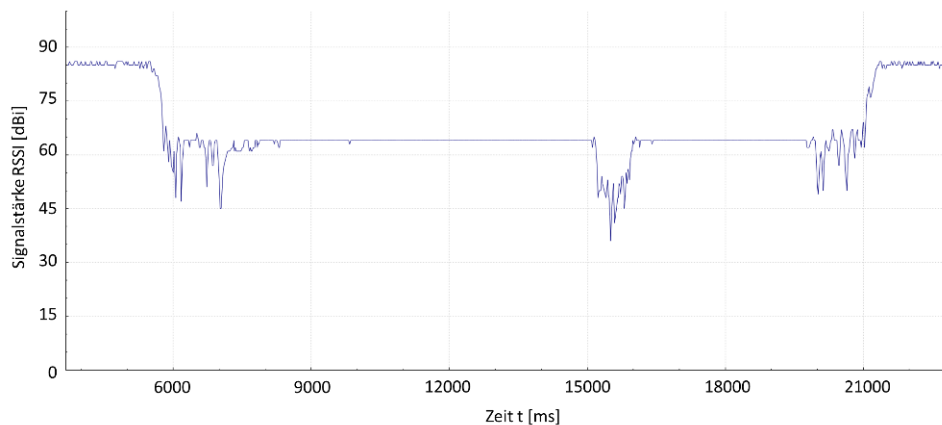


Eigenschaften Testfeld Wilhelm Schröder GmbH	
Standort	58849 Herscheid – NRW
Systeminstallation	permanent
Länge der Messbereiche	Variabel: 1m bis 10m
Anzahl Detektionsbereiche	3 unterschiedl. Testbereiche
Energieversorgung	12V DC
Datenaufzeichnung	Mini-PC pro System
Systemzugriff	Fernzugriff per Mini-PC (über WLAN / Eingriff vor Ort)
Systemüberwachung	Kameraüberwachung mit Aufzeichnung (Anbindung an WLAN)

### ERGEBNISSE TESTFELD WILHELM SCHRÖDER GMBH

Ein erster Anwendungsfall des Testfelds war die Erprobung eines veränderten Konzepts zur Energieversorgung. Innerhalb der Leitpfosten wird mit Niederspannung mit maximal 12V DC gearbeitet, was im Verkehr das Risiko der elektrischen Spannung oder eines Kurzschlusses bei einem Unfall eliminiert. Der Transformator (230V AC zu 12V DC) wird im Schaltschrank, gemeinsam mit weiteren Fehlerstrom-Schutzschaltern (FI) verortet. Für den späteren Fall einer zwingend notwendigen Positionierung des Transformators im Leitpfosten, wird dieser im unteren Bereich montiert, bestenfalls im Erdreich versenkt.

Ebenso wurden auf der Teststrecke die Iterationsschritte des Algorithmus (Abschnitt 3.2.2) und des Antennendesigns (Abschnitt 3.3.1) evaluiert. So konnten ein diffizileres Antennendesign und die Erkennung von mehreren gleichzeitigen Einbrüchen der Signalstärke die Detektion von mehreren Fahrzeugen im System ermöglichen, was Abbildung 26 darstellt.



**Abbildung 26:** RSSI Signalpegel einer Funkverbindung mit zwei parallelen Fahrzeugen

Hier ist zu sehen, dass ein Fahrzeug (LKW) nach 6s in das System fährt und nach ca. 8s im System hält. Ein weiteres Fahrzeug (PKW) fährt nach 16s auf einer zweiten Fahrspur vorbei. Nach ca. 20s bewegt sich das erste Fahrzeug wieder und verlässt den Detektionsbereich. Dies bildet somit die Voraussetzung für die Detektion des mehrspurigen Verkehrs. Die Machbarkeit konnte somit klar dargelegt werden.

## TESTINSTALLATION WESTFALENHALLEN

Neben den oben genannten Systemen zur Parkplatzbilanzierung für LKW und PKW an Autobahnen hat sich durch die gute Vernetzung im Dortmunder Raum und durch die Unterstützung der Stadt Dortmund ein weiteres Einsatzgebiet ergeben. Der Wilhelm Schröder GmbH wurde eine Testinstallation an einem Parkplatz nahe den Dortmunder Westfalahallen erlaubt. Der Betreiber hat ein Interesse daran, ein- und ausfahrende PKW zu detektieren, um später eine Langzeitstatistik betreiben zu können. Personal zur Bewirtschaftung der Parkplätze bei Veranstaltungen kann so besser geplant und eingeteilt werden.



**Abbildung 27:** Aufbau des Systems über Ein- und Ausfahrt und Gehweg

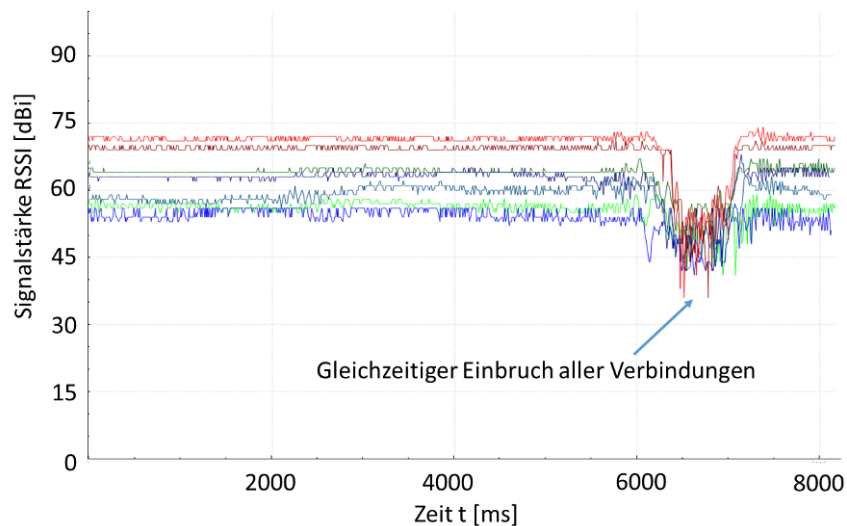
Die Anforderungen an das System sind durch die örtlichen Gegebenheiten und das Einsatzgebiet anders gelagert als bei den oben beschriebenen Installationsszenarien. Ein System muss zum ersten Mal eine zweispurige Ein- und Ausfahrt abdecken (siehe Unterunterabschnitt 3.1.1). Zudem ist die Installation der Pfosten auf eine Gesamtlänge von 1m verkürzt, bedingt durch den geringen Platz im Zufahrtsbereich des Parkplatzes. Eine zusätzliche bauliche Herausforderung stellen u. a. die zahlreichen Schilder und Laternen dar, die das Funkfeld beeinflussen können (mögliche Reflexionen der Funkwellen durch diese Metallkörper). Neben den ein- und ausfahrenden PKW sind zudem Personen im System zu detektieren und herauszufiltern, da sich die Gehwege innerhalb des Messbereichs befinden.

Eigenschaften Testinstallation Westfalahallen	
Standort	Joseph-Scherer-Str., Dortmund
Systeminstallation	permanent
Länge der Messbereiche	1m
Anzahl Detektionsbereiche	1, Einfahrt + Ausfahrt (2-spurig)
Energieversorgung	Akku-Betrieb
Datenaufzeichnung	Systemintern (SD-Karte)
Systemzugriff	manuell
Systemüberwachung	Stichprobenartig vor Ort / per Akku-Kamera bei Veranstaltungen

## ERGEBNISSE TESTINSTALLATION WESTFALENHALLEN

Um auf die oben beschriebenen schwierigen Umfeldbedingungen zu reagieren, wurde der auf dieses Szenario zugeschnittene Algorithmus genutzt (vgl. Abschnitt 3.2.2). Ein Fahrzeug gilt dabei als detektiert, wenn gleichzeitig alle Verbindungen eingebrochen sind. Abbildung 28 zeigt den Signalpegel des

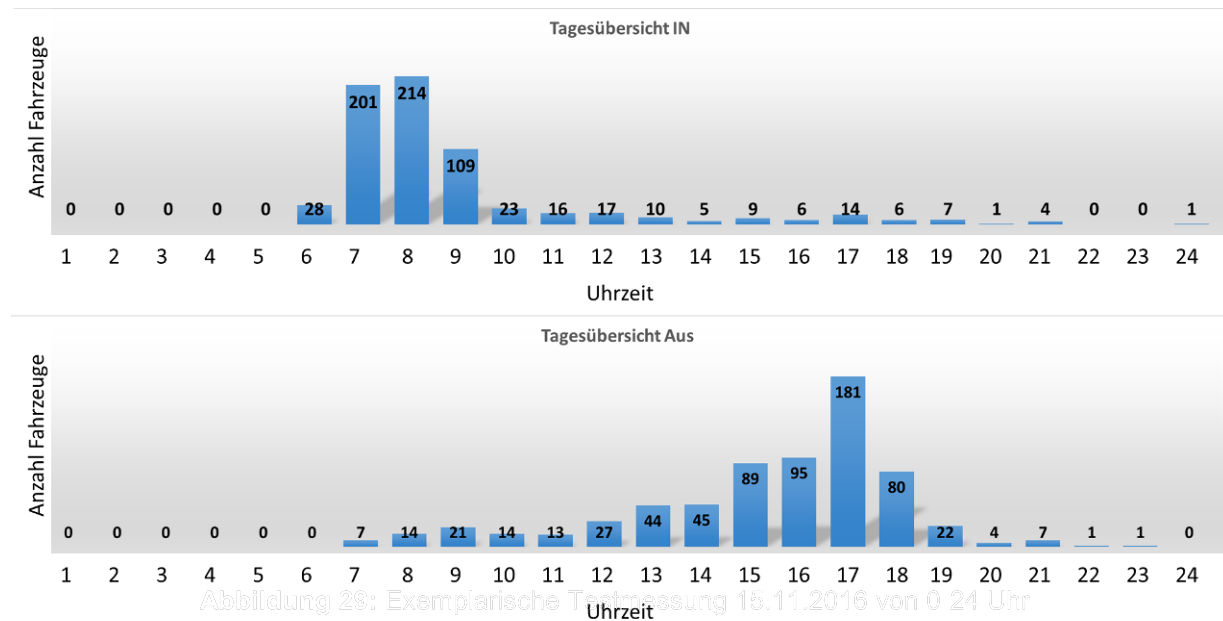
Sensorsystems. Ein PKW durchquert das Funkfeld und löst dabei einen Einbruch aller Funkverbindungen aus. Zudem ist auch in der Abbildung zu erkennen, dass die Signalstärke recht gering ist und die Signalpegel mehr Rauschen aufweisen (vgl. Abbildung 26), was auf die Umfeldbedingungen zurückzuführen ist.



**Abbildung 28:** RSSI Signalpegel mit gleichzeitigem Einbruch aller Verbindungen durch ein Fahrzeug

An den Westfalahallen wurden mehrere Testsituationen detaillierter evaluiert. Da der Testparkplatz unter der Woche auch durch eine ansässige Firma genutzt wird, gibt es einen Regelbetrieb, der gleichmäßige Resultate liefert. Exemplarisch ist eine Übersicht über einen Wochentag in Abbildung 29 dargestellt. Es fuhren 671 Fahrzeuge auf den Parkplatz und 665 herunter, d.h. es verblieben 6 Fahrzeuge nach 24 Uhr auf dem Parkplatz. Zu sehen ist, dass zwischen 6 und 9 Uhr gehäuft Einfahrten sowie wie zwischen 15 und 18 Uhr vermehrt Ausfahrten erfolgen, was den Tagesbetrieb des ansässigen Unternehmens widerspiegelt. Eine maximale Belegung von 522 Fahrzeugen entspricht auch den Volumen des Parkplatzes. Zur Referenz wurden die Bildaufnahmen einer temporär installierten Kamera ausgewertet.

Zusätzlich zum Regelbetrieb wurde das System bei der Nutzung des Parkplatzes bei Veranstaltungen evaluiert. Hier wurde parallel zur Kameraauswertung für einige ausgewählte Veranstaltungen ein Abgleich der Ergebnisse mit dem Parkplatzbetreiber vorgenommen. Die Genauigkeit des Systems für die Detektion der einfahrenden Fahrzeuge wurde dabei durch die Betreiberfirma als ausreichend beschrieben (Abweichungen <2% zur manuellen Zählung durch Personal) und durch die Auswertung der Referenzkamera bestätigt. Die Situation bei Veranstaltungsende (Abbildung 30) ließ jedoch das System teilweise an seine Grenzen stoßen. Aufgelöst werden kann diese Herausforderung mit einer festen Installation des Systems, sodass der Messbereich nur die Fahrspuren ohne Gehwege abdeckt (keine Fußgänger im System). Zudem kann nach Abfluss des Verkehrs vom Parkplatz der Zähler für die Parkplatzbelegung automatisiert zurückgesetzt werden, wobei kleine Abweichungen in dieser Kalibrierung akzeptiert werden.



**Abbildung 30:** Exemplarische Situation im Messbereich nach Ende einer Veranstaltung

Somit ist festzuhalten, dass nach Ablauf dieses F&E-Projekts die Betreiberfirma des Parkplatzes als potenzieller Kunde in Frage kommt und bereits Interesse an einer weiteren Zusammenarbeit signalisiert hat.

#### FELDTTEST RASTSTÄTTE SAUERLAND-WEST

Um ein Gesamttestfeld außerhalb der eigenen Teststrecke der Wilhelm Schröder GmbH zu haben, wurde seit Mitte 2016 enger Kontakt zum nordrhein-westfälischen Landesbetrieb „Straßen.NRW“ gepflegt. Ziel dabei war es, einen Parkplatz vollumfänglich ausstatten zu können und hier die Entwicklungen unter realen Bedingungen im Feld zu erproben. Im Gegensatz zum Parkplatz Bönen sollte ein dauerhafter Betrieb der Sensorik dabei gewährleistet sein, was ein Konzept zur Energieversorgung mit einschloss. Hier bot sich nach Abstimmung mit Straßen.NRW an, die im Umbau befindliche Raststätte „Sauerland-West“ an der A45 zu nutzen. Bei der Renovierung der gesamten Anlage in 2016 / 2017 wurden daher entsprechende Leerrohre seitens Straßen.NRW vorgesehen, die Installation des Systems wurde anschließend ab Mitte 2017 durch die Wilhelm Schröder GmbH veranlasst.





**Abbildung 31:** Aufbau des Systems an Ein- und Ausfahrt der Tank- und Rastanlage



**Abbildung 32:** Ausstattung des Versorgungswegs

Neben der Einfahrt und der Ausfahrt musste zudem auch ein Versorgungsweg mit einem System ausgestattet werden, um eine vollumfängliche Bilanzierung des Parkplatzes durchführen zu können (Abbildung 32). Der Versorgungsweg bietet die Möglichkeit vom Parkplatz in das nahe gelegene Industriegebiet abzufahren. Auch wenn dieses durch die Beschilderung verboten ist, wird diese Option regelmäßig von Unbefugten genutzt. Die Energieversorgung der einzelnen Messbereiche wurde dabei mit 12V DC per Kabel hergestellt.

Eigenschaften Testinstallation A45 Sauerland-West	
Standort	58513 Lüdenscheid – NRW
Systeminstallation	permanent
Länge der Messebereiche	5m
Anzahl Detektionsbereiche	Einfahrt, Ausfahrt, Versorgungsweg
Energieversorgung	12V DC
Datenaufzeichnung	Intern / Mini-PC pro System
Systemzugriff	<i>In Bearbeitung, Anbindung an Web-Portal über Mobilfunk</i>
Systemüberwachung	Kameraüberwachung mit Aufzeichnung, Stichproben vor Ort

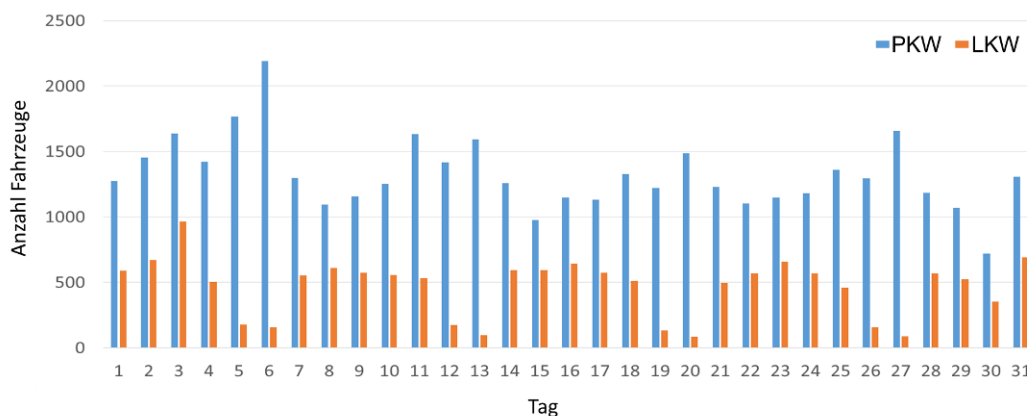
**ERGEBNISSE TESTPARKPLATZ SAUERLAND-WEST**

Mit der Installation an der Raststätte Sauerland-West konnten zunächst wesentliche Erfahrungen in Planung und Ablauf gewonnen werden, um bei der Herstellung der Anschlüsse, der Verkabelung und der Befestigung die Vorgaben im öffentlichen Verkehrsraum einzuhalten. Gemeinsam mit dem Landesbetrieb Straßen.NRW und den entsprechenden, für den Straßenverkehr lizenzierten Subunternehmen wurden diese Schritte ausgeführt, die für den späteren Ablauf bei der Installation des fertigen Produkts ebenfalls mit eingeplant werden müssen. Auch war die notwendige Ausstattung des Versor-

gungswegs mit einem Sensorsystem als dritter Messbereich ein weiterer Aspekt, der in künftigen Planungen Beachtung finden kann. Zudem können die hierbei entstandenen Kontakte nach Beendigung des F&E-Projekts für die Vermarktung und den Vertrieb eines ausentwickelten Produkts von Nutzen sein.

Bei den ersten Messungen konnten mehrere Erkenntnisse bezüglich der Sensorsysteme und deren Detektionsgenauigkeit gewonnen werden. So arbeiten die Messbereiche an Ausfahrt und Versorgungsweg in akzeptablen Bereichen. Das System an der Einfahrt bot jedoch große Herausforderungen aufgrund der vorhandenen Geometrien dieser Parkplatz-Zuwegung. Aufgrund der sehr kurzen Einfahrt wurde eine Systemlänge von 5m anstelle von 10m gewählt. Auch steht das System leicht diagonal versetzt (linke Fahrbahnseite zu rechte Fahrbahnseite), da sich im System die Fahrbahn bereits deutlich zur Tankstelle hin verbreitert (vgl. Abbildung 31 links) und das Funkfeld über eine große Distanz aufgespannt werden muss. Gleichzeitig verursacht diese Fahrbahnbreite, dass LKW im Messbereich für längere Zeit halten, was den Signalpegel der Sensorik weiter verschlechtert und sich negativ auf die Genauigkeit der Detektion und Fahrzeugklassifizierung auswirkt.

Trotz dieser Probleme, die im Laufe des Projekts durch Sendeleistungsanpassungen und Antennencharakteristik (vgl. Abschnitt 3.3.1) bereits deutlich verringert wurden, können erste Ergebnisse des Testfelds präsentiert werden. Abbildung 33 zeigt den Monatsverlauf ein- und ausfahrender Fahrzeuge im Monat August aufgeteilt nach PKW und LKW. Deutlich zu erkennen sind bei Betrachtung der LKW die Wochenenden (05.08. - 06.08., 12.08. - 13.08., 19.08. - 20.08. 26.08. - 27.08.), wo deutlich weniger Fahrzeugbewegungen registriert wurden.



**Abbildung 33:** Anzahl parkender Fahrzeuge des Monats August nach PKW und LKW

Durch die langfristige Nutzungserlaubnis durch Straßen.NRW für die Tank- und Rastanlage Sauerland-West, werden hier nach Abschluss des F&E-Projekts weitere Optimierungen vorgenommen, um alle vorgestellten Testfelder mit sehr guten und verwertbaren Resultaten belegen zu können.

### 3.3.3 FAZIT TESTBETRIEB

Der Testbetrieb startete nach Erstellung der ersten prototypischen Sensoren und wurde über die Projektlaufzeit weiter intensiviert. Als Resultat dieses Testbetriebs kann eine durchschnittlich gute Detektion von Fahrzeugen mit entsprechender Klassifikation der Fahrzeugklasse festgehalten werden. Dieses Ergebnis wird genutzt, um nach Abschluss des F&E-Projekts die weiteren Schritte zur Zertifizierung der Elektronik einzuleiten (TÜV und CE-Kennzeichnung) und für die unterschiedlichen Bereiche in die Produktentwicklung einzusteigen. Für die weiteren Installationen an Autobahnen sind zusätzliche Zertifizierungen durch die Bundesrepublik Deutschland notwendig, welche ebenfalls angestrebt werden.

## **4 FAHRZEUGDETEKTION UND –KLASSIFIKATION AUF BASIS MASCHINELLER LERNVERFAHREN**

**Verantwortlicher Partner:** TU Dortmund

Die im Rahmen dieses Projektes vom Lehrstuhl für Kommunikationsnetze der TU Dortmund bearbeiteten Arbeitspakete (AP) und die hierbei in Synchronisation mit den Projektpartnern erreichten Ziele werden nachfolgend beschrieben.

### **Aufbau eines Simulationsumfelds für Radiotomographie (AP2)**

In diesem Arbeitspaket wurde eine Simulationsumgebung für Radiotomographie zwecks Leistungsbewertung der in den nachfolgenden APs implementierten Entscheidungsalgorithmen aufgebaut. Der Vorteil einer solchen Simulationsumgebung ist die Möglichkeit zur Modellierung von Szenarien mit verschiedenen Umgebungen (u.a. Kanaleigenschaften), unterschiedlichen Parametrisierungen des Messsystems (u.a. verschiedene Antennensysteme) und einer Vielzahl an Fahrzeugmodellen. Im nächsten Schritt wurde eine Validierung der simulativ gewonnenen Ergebnisse mit von einem realen Messsystem aufgezeichneten Daten durchgeführt, um die Aussagekraft ersterer sicherzustellen. Hierauf aufbauend wurden die generierten Simulationsergebnisse im weiteren Projektverlauf zum Testen der implementierten Entscheidungsalgorithmen und für die Untersuchung von Sondersituationen, wie die Detektion dicht aufeinander fahrender Fahrzeuge, eingesetzt.

### **Entwicklung und iterative Optimierung der Entscheidungsalgorithmen auf Basis von Musterklassifikationsverfahren (AP3, AP4)**

Bevor die mit dem Messsystem aufgezeichneten Daten (RSSI-Zeitverläufe) zwecks Fahrzeugklassifikation verwendet werden können, müssen diese zunächst einer Datenaufbereitung, die im Wesentlichen eine Extraktion der für die Fahrzeugklassifikation relevanten Abschnitte der RSSI-Zeitreihen vorsieht, unterzogen werden. Neben diesen extrahierten RSSI-Zeitverläufen können aber auch aus diesen abgeleitete statistische Größen (Features) für eine Fahrzeugklassifikation eingesetzt werden. Diese aufbereiteten Daten dienen als Eingabe für die implementierten Entscheidungsalgorithmen, deren resultierende Klassifikationsgenauigkeit als entscheidender Indikator für die Leistungsbewertung herangezogen wurde. Neben der Klassifikationsgenauigkeit wurde zudem die Präzision bei der Zählung von Fahrzeugen auf mehrspurigen Straßen sowie die Abschätzung der Fahrgeschwindigkeit untersucht. Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse wurden für eine iterative Optimierung des Gesamtsystems genutzt.

### **Definition der Sensordatenstruktur (AP5)**

Für die Übermittlung der im Vorfeld aufbereiteten Daten bzw. der Klassifikationsergebnisse wird eine effiziente Sensordatenstruktur, die eine Minimierung der Datenmenge unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Klassifikationsgenauigkeit ermöglicht, benötigt. Dementsprechend wurde im Rahmen dieses Arbeitspaketes untersucht, wie sich die Übertragung von aufbereiteten RSSI-Zeitreihen im Vergleich zu derjenigen von abgeleiteten Features auf das resultierende Datenvolumen auswirkt und welche Klassifikationsergebnisse sich mit unterschiedlichen Auslösungen jener Daten erzielen lassen. Die Ergebnisse dieser Untersuchung wurden anschließend für die Definition einer effizienten Sensordatenstruktur in Abstimmung mit der Fa. Schröder verwendet.

### **Überführung der Algorithmik auf Hardware und Validierung der Verfahren durch Feldtests (AP6, AP7)**

Neben der Definition einer effizienten Sensordatenstruktur ist die Wahl einer geeigneten Kommunikationsschnittstelle zur Übermittlung der lokal generierten Daten und Ergebnisse von großer Wichtigkeit.

Aufbauend auf den Ergebnissen der Energiebilanzierung verschiedener Kommunikationstechnologien wurde die für den gegebenen Einsatzzweck geeignete Kommunikationsschnittstelle definiert. Darüber hinaus wurden die in den Arbeitspaketen AP3 und AP4 evaluierten Entscheidungsalgorithmen in Abstimmung mit der Fa. Schröder auf ein eingebettetes System überführt. Wesentliche, für die Bewertung der Klassifikationsalgorithmik relevante Aspekte waren hierbei Klassifikationsgenauigkeit, Energiebedarf, Laufzeit und Speicherbedarf. Mit Hilfe neuer Daten aus weiteren Feldmessungen wurde die portierte Klassifikationsalgorithmik zudem rekursiv optimiert und validiert.

## 4.1 ENTWICKLUNG UND LEISTUNGSBEWERTUNG DER ENTSCHEIDUNGSGRUNDLAGENALGORITHMEN (AP3, AP4)

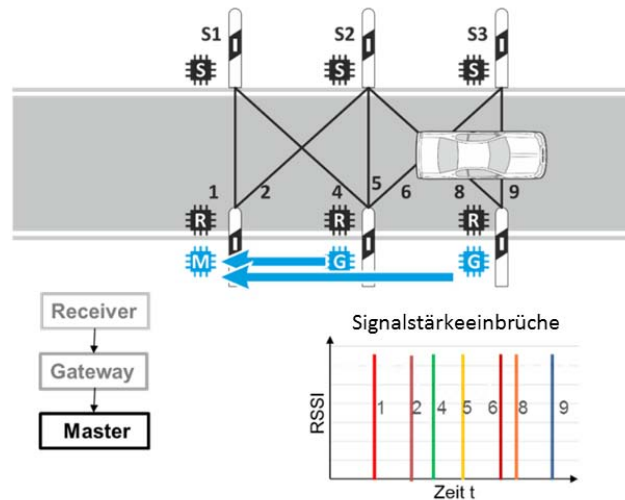
Komplexe Detektions- und Klassifikationsaufgaben wie Fahrzeugerkennung, -zählung, Geschwindigkeitsschätzung sowie die Klassifikation von Fahrzeugtypen können automatisiert mit Hilfe von Musterklassifikationsverfahren durchgeführt werden. In den folgenden Abschnitten werden die im ersten Unterkapitel vorgestellten Entscheidungsalgorithmen hinsichtlich ihrer Eignung im Bereich der Fahrzeugdetektion und -klassifikation untersucht. Im weiteren Verlauf dieses Kapitels werden des Weiteren Aspekte wie Datenaufbereitung und Feature Extraktion sowie die Problematik der Fahrzeugklassifizierung auf mehrspurigen Straßen behandelt.

### 4.1.1 ENTSCHEIDUNGSGRUNDLAGENALGORITHMEN FÜR DIE FAHRZEUGKLASSIFIKATION

Im Vergleich zum Antrag wurde, in Abstimmung mit der Firma Schröder, der Fokus des Projektes von der Detektion auf die Klassifikation von Fahrzeugen geändert. In diesem Abschnitt werden die Verfahren zur Fahrzeugdetektion und -klassifikation vorgestellt. Dabei wird die auf Mustererkennungsverfahren basierende Detektionsalgorithmik mit Rohdaten, welche mithilfe des Sensorsystems gewonnen werden, und hiervon abgeleiteten Attributen (Features) trainiert. Zur Steigerung von Genauigkeit und Performance der Detektions- und Klassifikationsalgorithmen, insbesondere im Fall von Sondersituationen, werden simulativ gewonnene Daten zum Vergleich herangezogen (vgl. Abschnitt 4.2.2). Hierbei ermöglicht die Simulationsumgebung eine Abbildung verschiedener Szenarien mit Rücksicht auf spezifische Rahmenbedingungen (Umgebungs- und Verkehrsteilnehmercharakteristik).

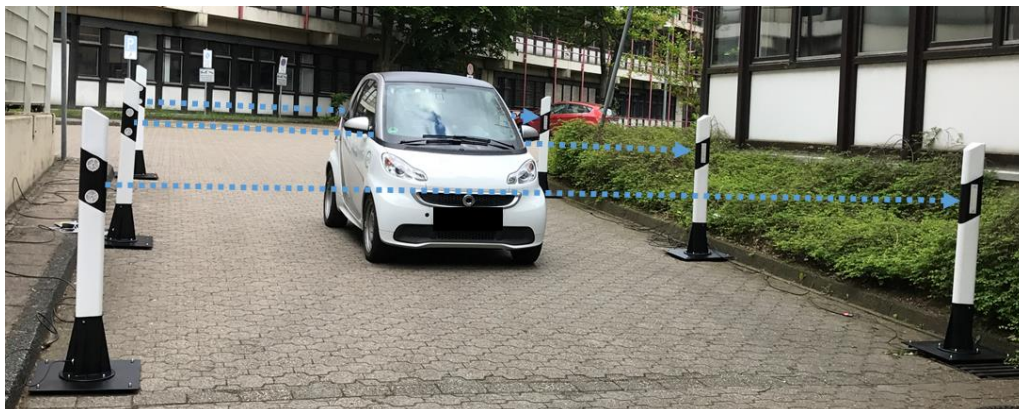
Der Detektionsalgorithmus wertet zur Erkennung von Fahrzeugen, welche durch das Messsystem fahren, die zeitliche Abfolge von Signalstärkeeinbrüchen verschiedener Kommunikationsverbindungen aus. Abbildung 34 und Abbildung 35 veranschaulichen diese Prozedur beispielhaft für die Durchfahrt eines PKW und die resultierenden Signalstärkeeinbrüche der einzelnen Funkverbindungen.





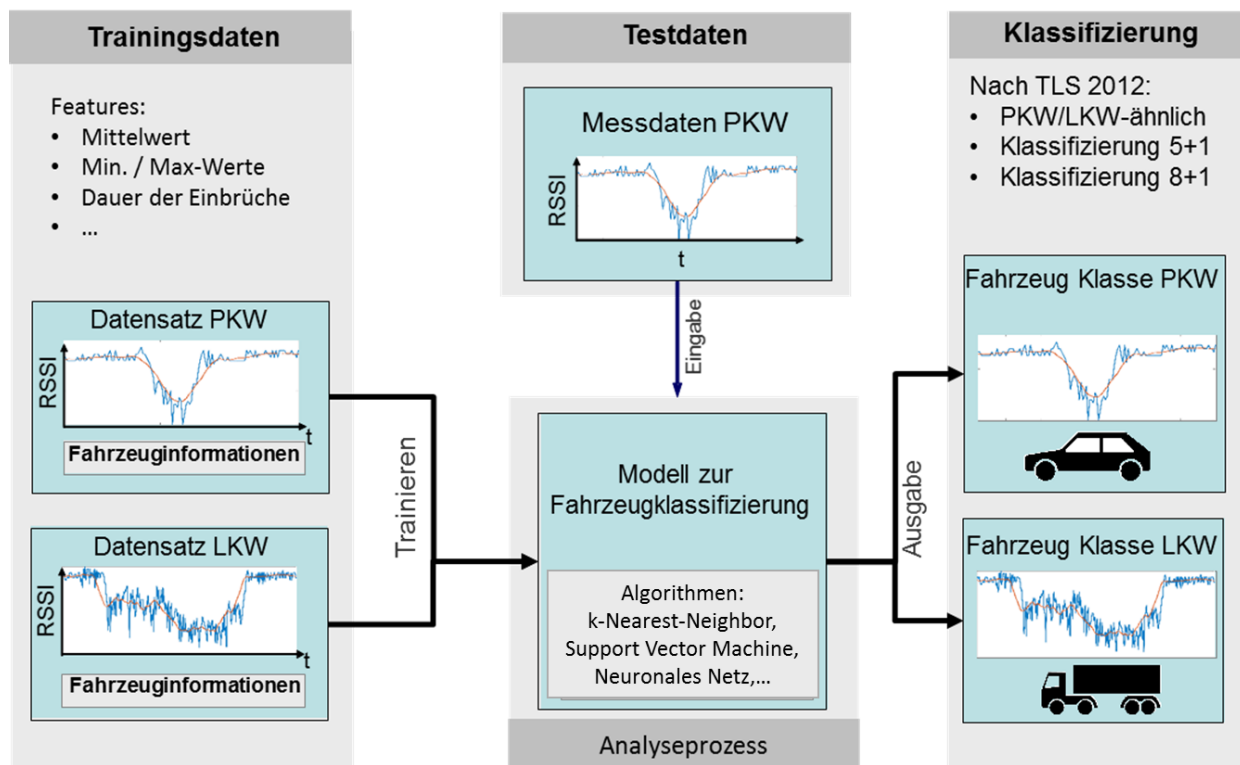
**Abbildung 34:** Beispielhafte Durchfahrt eines PKW durch das Messsystem und resultierende Signalstärkeeinbrüche verschiedener Verbindungen

Zur Fahrzeugdetektion und -klassifikation wurden in diesem Projekt vier Mustererkennungsverfahren eingesetzt. Diese Verfahren erzeugen ein Modell basierend auf Trainingsdaten, welches auf die zu testenden Daten angewandt wird (siehe Abbildung 36). Schon während der Entwicklungs- und Erprobungsphase des neuen Messsystems wurde die Mustererkennung mit realen Messdaten des zuvor bestehenden Systems angelernt, um diese bestmöglich und äußerst präzise auf die deutlich höher aufgelösten Messdaten des neuen Systems vorzubereiten.



**Abbildung 35:** Beispielhafte Durchfahrt eines PKW durch das Messsystem

Die in diesem Projekt verwendeten Mustererkennungsverfahren sind: Decision Tree (DT), k-Nearest-Neighbor (kNN), Support Vector Machine (SVM) und Neuronales Netz (NN).



**Abbildung 36:** Funktionsweise der Datenanalyse zur Klassifizierung von Fahrzeugen bei Nutzung von RSSI-Zeitreihen

### Decision Tree

Eine im Bereich der Mustererkennung primär zu lösende Aufgabe besteht darin, die für die Lösung des jeweiligen Problems relevanten Informationen aus einem Strom von Eingabedaten zu extrahieren. Der DT-Algorithmus ist ein geordneter und gerichteter Baum, der die Attribute einer Eingabe in Abhängigkeit ihrer Relevanz in einzelne Entscheidungsknoten kapselt. In Abbildung 37 ist ein DT-Beispiel exemplarisch für zwei Attribute (Länge und Einbruchtiefe) dargestellt. Hierbei lässt sich die Bedeutung einzelner Attribute anhand ihrer jeweiligen Tiefe im Baum erkennen [1]. Für das gezeigte DT-Beispiel nimmt das Attribut Einbruchtiefe folglich eine untergeordnete Rolle ein.

### k-Nearest-Neighbor

Anders als bei dem DT-Algorithmus bedarf es im Falle des kNN-Algorithmus keines separaten Trainingsprozesses. Das für die Klassifikation benötigte Wissen entspricht somit dem gesamten vorliegenden Datensatz. Um ein unbekanntes Objekt zu klassifizieren, wird im Klassifikationsprozess nach dem Objekt mit der größten Ähnlichkeit in Bezug auf die gegebenen Merkmale gesucht. Der Parameter  $k$  definiert die Anzahl der zu verwendenden nächsten Nachbarn (Objekte mit größter Ähnlichkeit) für die Klassifikation. In Abbildung 38 (links) ist ein zweidimensionaler Merkmalsraum mit zwei Klassen (Kreis und Kreuz) aufgespannt. Dabei wird die Klassifikation beispielhaft für  $k=1$  und  $k=3$  dargestellt. Ein Mehrheitsentscheid wird immer dann getroffen, wenn der Parameter  $k$  Werte größer als eins annimmt [2].

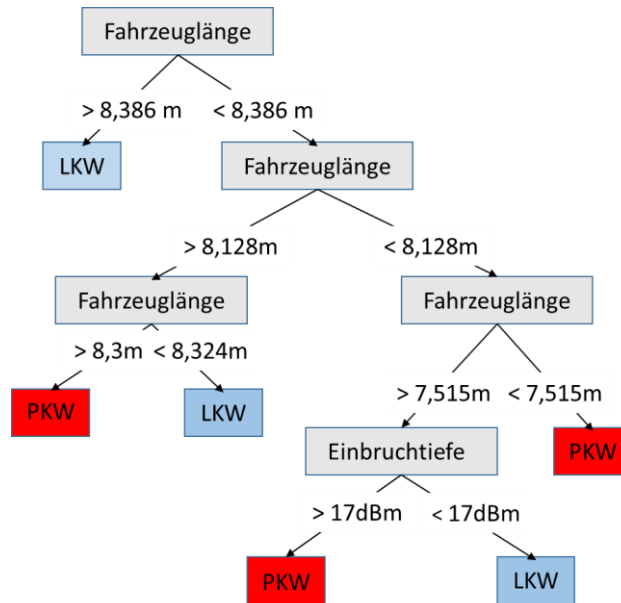


Abbildung 37: Decision-Tree-Beispiel mit den zwei Attributen Fahrzeu glänge und Einbruchtiefe

### Support Vector Machine

Ein gänzlich anderer Ansatz in Bezug auf die Klassifikation wird bei der SVM verfolgt. Diese konstruiert eine sog. Hyperebene, die die Objekte verschiedener Klassen im (mehrdimensionalen) Merkmalsraum voneinander trennt. Durch das Training wird die Hyperebene solange verschoben und optimiert, bis ein größtmöglicher Abstand (Margin) der Hyperebene zu beiden Klassen gefunden ist [2]. Abbildung 38 (rechts) demonstriert anhand eines Beispiels für einen zweidimensionalen Merkmalsraum und zwei Klassen die Stellung der Hyperebene nach einem optimalen Trainingsprozess. Allerdings sind die zu klassifizierenden Eingabedaten häufig nicht streng linear separierbar, sodass keine optimale Hyperebene gefunden werden kann. Als Ursache für nicht-separierbare Daten können bspw. Messfehler bei der Datenaufzeichnung oder spezifische Charakteristika der Messgrößen genannt werden. In diesem Fall besteht die Möglichkeit, die zu klassifizierenden Eingabedaten in einen Raum höherer Dimension zu transformieren, sodass dadurch die Anzahl möglicher Trennungen mit gleichzeitigem Anstieg der Berechnungskomplexität erhöht werden kann.

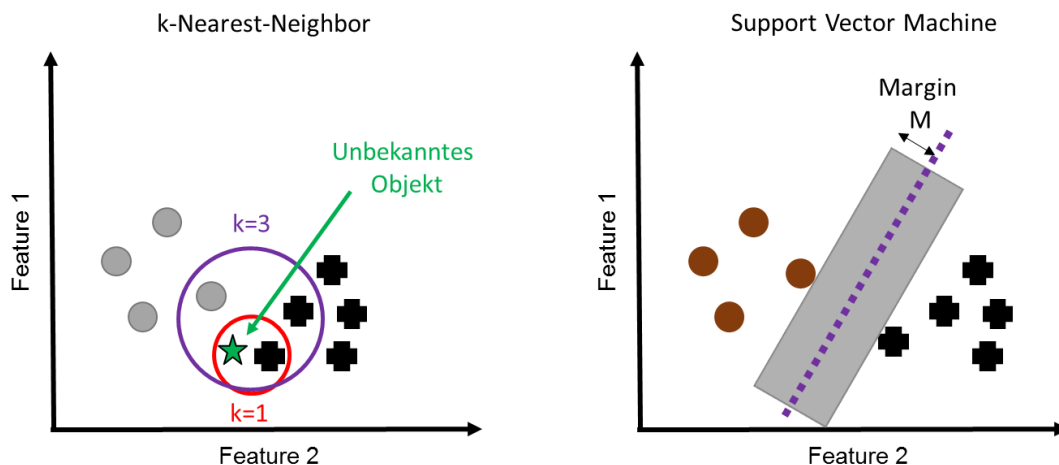
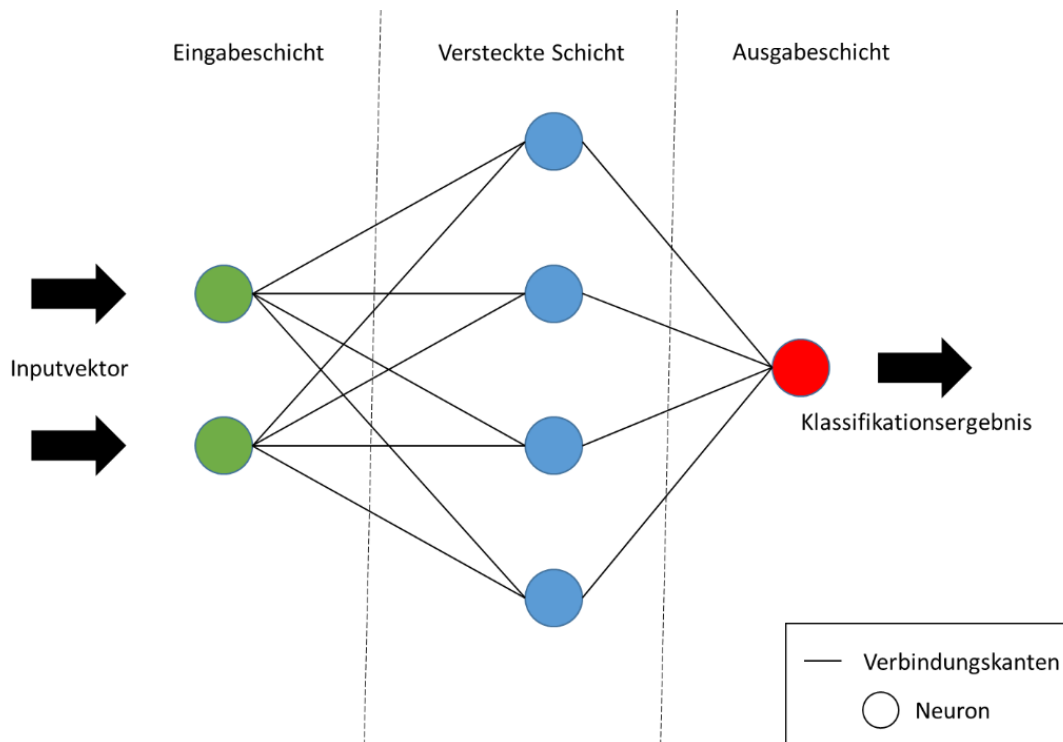


Abbildung 38: Funktionsskizze eines k-Nearest-Neighbor-Algorithmus (links) und einer Support Vector Machine (rechts) mit jeweils zwei Features

## Neuronales Netz

Für die Lösung derartiger komplexer Probleme bietet sich als effizientere Alternative die Verwendung von Neuronalen Netzen an. Ein Neuronales Netz ist ein nichtlineares und statistisches Modell, welches aus jeweils einer Ein- und Ausgabeschicht sowie z.T. mehreren versteckten Schichten mit beliebig vielen Neuronen besteht (siehe Abbildung 39).



**Abbildung 39:** Funktionskizze eines Neuronalen Netzes mit einer versteckten Schicht

Die Gewichtungen der versteckten Schichten (Hidden Layer) bestehen aus Linearkombinationen der Eingabeschicht, die der Ausgabeschicht wiederum aus Linearkombinationen der versteckten Schicht. Durch das Trainingsset werden die Gewichtungen der Neuronen und Verbindungskanten der drei Schichten optimiert [1]. Die Anzahl der Gewichte ( $G_A$ ) berechnet sich für den Sonderfall, dass nur eine versteckte Schicht verwendet wird, wie folgt:

$$G_A = (L + 1)M + (M + 1)N,$$

wobei  $L$ ,  $M$  und  $N$  der Anzahl der Neuronen der Eingabe-, Versteckten- und Ausgabeschicht entspricht. Aus der Anzahl der Gewichte ergibt sich der Bedarf an Beispieldaten für das Training des Neuronalen Netzes. Für gewöhnlich werden für ein optimales Training pro Gewicht rund 10 Beispiele benötigt [2].

### 4.1.2 TOOLING FÜR DATENAUFBEREITUNG UND KLASSIFIKATION

Zwecks Datenaufbereitung und Klassifikation wurden verschiedene Frameworks verwendet (RapidMiner Studio, Matlab und Scikit-Learn), die im Folgenden erläutert werden. Der Einsatz mehrerer Frameworks hat den Vorteil, dass die Ergebnisse schrittweise verglichen und validiert werden können.

Eine Umgebung für Datenaufbereitung, maschinelles Lernen und Modellentwicklung ist RapidMiner Studio der Firma RapidMiner [3]. RapidMiner Studio ermöglicht eine komfortable Durchführung von Untersuchungen mit verschiedenen Klassifikationsalgorithmen. Allerdings erlaubt RapidMiner Studio keine Anpassung von Klassifikationsparametern über eine Programmschnittstelle, weswegen eine automatisierte Evaluierung geeigneter Parameter nicht möglich ist.

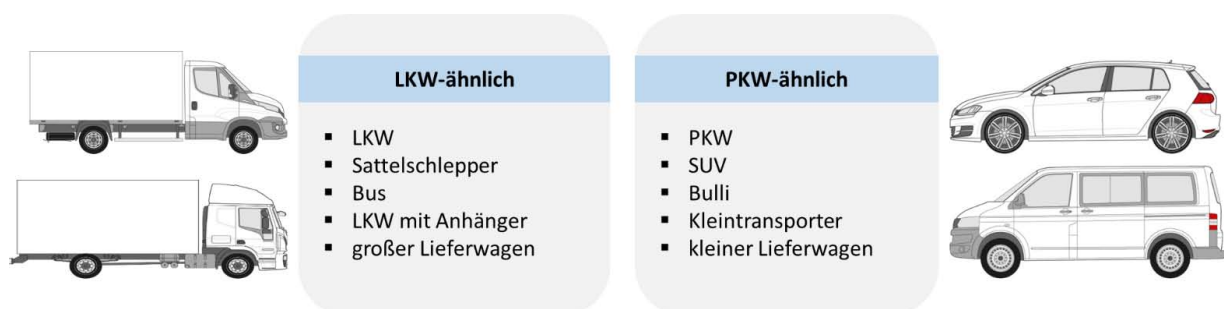
Ebenfalls wurde das Programm Matlab der Firma MathWorks [4] verwendet, das sich durch seine umfangreichen Bibliotheken, insbesondere im Bereich der maschinellen Lernverfahren, und seine übersichtliche grafische Bedienoberfläche auszeichnet. Allerdings erweist sich die mit der Ausführung von Matlab einhergehende intransparente Optimierung der Klassifikationsparametrisierung als nachteilig.

Das von Google für die Skriptsprache Python bereitgestellte Framework Scikit-Learn [5] für maschinelles Lernen erlaubt die Integration diverser, für den jeweiligen Einsatzzweck benötigter Klassifikationsalgorithmen in eigene Python-Skripte, womit verschiedene Algorithmen mitsamt unterschiedlicher Parametrisierungen auch auf leistungsschwächeren Rechnersystemen wie eingebetteten System evaluiert werden können.

Die in diesem Projekt gewählte Toolchain sah Matlab primär für die Auf- und Vorbereitung der Rohdaten (Zuschneiden und manuelles Labeln) vor, während sowohl RapidMiner Studio als auch Scikit-Learn hauptsächlich für die Durchführung der Fahrzeugklassifikation genutzt wurden. Hierbei tat sich vor allem Scikit-Learn aufgrund seines geringen Ressourcenbedarfs hinsichtlich Speicher- und Rechenaufwand, seiner vielfältigen Parametrisierungsmöglichkeiten der Klassifikationsverfahren sowie der Möglichkeit zur Ausführung auf eingebetteten Systemen hervor. Die im Rahmen dieses Projektes erfolgten Klassifikationsanalysen wurden folglich primär mit Scikit-Learn durchgeführt.

#### 4.1.3 DATENSATZGENERIERUNG UND LABELING

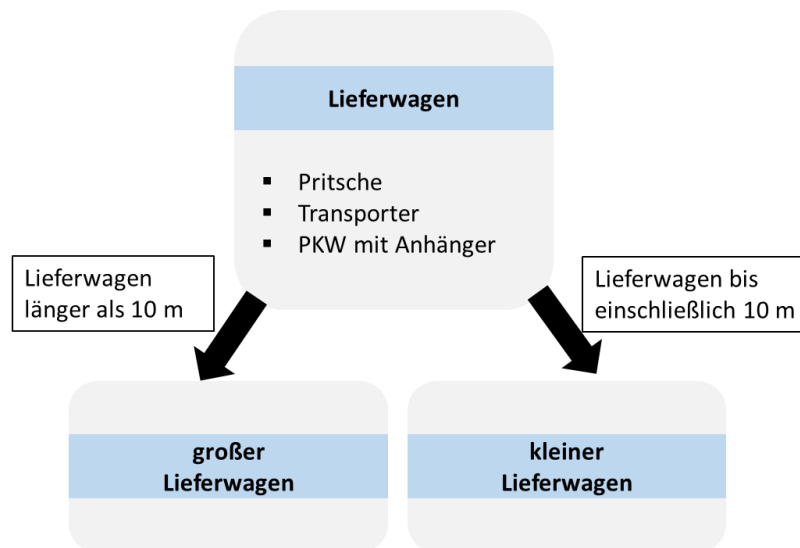
Der in diesem Projekt verwendete Datensatz wurde an den Ein- und Ausfahrten der Autobahnraststätte Gelbese im Rahmen des offiziellen Testfeldes „Digitales Testfeld Autobahn A9“ des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur aufgezeichnet und mit den simulativ gewonnenen Ergebnissen verglichen.



**Abbildung 40:** Klassifikation von Fahrzeugen in die Klassen PKW- bzw. LKW-ähnlich

Dieser Datensatz umfasst die bei der Durchfahrt von 2971 Fahrzeugen durch das Messsystem aufgezeichneten RSSI-Rohdaten. Zwecks weiterer Verwendung wurden die zeitlich relevanten Abschnitte der RSSI-Rohdaten extrahiert und anschließend händisch gelabelt. Der für die Klassifikation der Fahrzeuge verwendete Aufteilungsschlüssel nach PKW- oder LKW-ähnlichen Typen ist in Abbildung 40 dargestellt.

Konkret werden die Fahrzeugtypen PKW, SUV, Bulli, Kleintransporter und kleiner Lieferwagen der Klasse der PKW-ähnlichen Fahrzeuge zugeordnet, während LKW, LKW mit Anhänger, Sattelschlepper, Bus und großer Lieferwagen Mitglieder der Klasse der LKW-ähnlichen Fahrzeuge darstellen. Zu beachten ist hierbei ein spezieller Fahrzeugtyp, zur Vereinfachung nachfolgend als Lieferwagen bezeichnet, bei dem nach Vorgaben durch die Autodirektion Südbayern eine gesonderte Klassifizierung in die Klassen kleiner respektive großer Lieferwagen in Abhängigkeit der Fahrzeuglänge mit einem Schwellwert von 10 Metern erfolgen soll (s. Abbildung 41).



**Abbildung 41:** Aufteilung von Fahrzeugen des Typs Lieferwagen in die Klassen kleiner bzw. großer Lieferwagen anhand der Fahrzeuglänge mit einem Schwellwert von 10 Metern

Im Folgenden werden zwei unterschiedliche Aufteilungen des gesamten Datensatzes an Fahrzeugdurchfahrten vorgestellt. Zum einen wurde eine „80/20-Aufteilung“ durchgeführt (Testset A, Tabelle 4), bei der 80 Prozent der Daten als Trainingset und die übrigen 20 Prozent als Testset für die Klassifikatoren herangezogen werden.

Dieser Ansatz hat zum Ziel, verschiedene Fahrzeugtypen auf zwei Klassen (binäre Klassifikation) abzubilden. Zum anderen wurde die Leistungsfähigkeit der Entscheidungsverfahren auch für eine feingranulare Klassifikation unterschiedlicher Testsets, basierend auf der Zertifizierungsvorschrift der Zentralstelle für Verkehrsmanagement der Autobahndirektion Südbayern, untersucht. Diese schreibt vor, dass die Fahrzeugtypenklassifikation auf Basis der Fahrzeuglänge zu erfolgen hat. Folglich wird zwischen zwei Datensets (Testset B.1 und Testset B.2, Tabelle 4) mit unterschiedlichen Anforderungen an die Klassifikationsgenauigkeit unterschieden. Diesbezüglich wurde der gesamte Datensatz in zwei unterschiedliche Subtestsets (Testset B.1 und Testset B.2, s. Tabelle 4) aufgeteilt. Diese Aufteilung orientiert sich an den unterschiedlichen Vorgaben hinsichtlich der Klassifikationsgenauigkeit. Laut Zertifizierungsvorschrift muss das Klassifikationssystem bei Nutzung von Testset B.1 eine Klassifikationsgenauigkeit von mindestens 99% erreichen, wohingegen die Genauigkeit bei Verwendung von Testset B.2 bei mindestens 80% liegen muss.

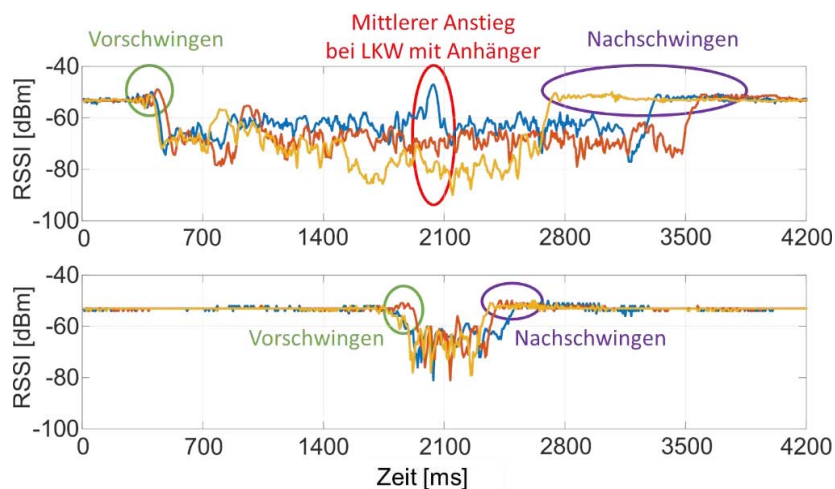


**Tabelle 4:** Aufteilung des Gesamtdatensatzes in drei Testsets: Testset A (alle Fahrzeuge), Testset B.1 (alle Fahrzeugtypen bis auf Lieferwagen), Testset B.2 (nur Lieferwagen)

	Testset A	Testset B.1	Testset B.2
<b>Vorgabe Klassifikationsgenauigkeit nach Zertifizierungsvorschrift</b>	-	99 %	80 %
<b>Fahrzeugtypen</b>			
PKW	X	X	
SUV	X	X	
Bulli	X	X	
Kleintransporter	X	X	
LKW	X	X	
Bus	X	X	
Sattelschlepper	X	X	
LKW mit Anhänger	X	X	
kleiner Lieferwagen	X		X
großer Lieferwagen	X		X

#### 4.1.4 DATENAUFBEREITUNG UND FEATURE EXTRAKTION

Um die an den Receivern des Messsystems empfangenen RSSI-Zeitverläufe als Eingabe für die Entscheidungsalgorithmen nutzen zu können, müssen diese zunächst aufbereitet werden. In Abbildung 42 sind sechs exemplarische RSSI-Zeitverläufe dargestellt, die bei der Durchfahrt von jeweils drei den Klassen „PKW-ähnlich“ und „LKW-ähnlich“ zugehörigen Fahrzeugen aufgezeichnet wurden. Offensichtlich unterscheiden sich die Zeitverläufe von PKW-ähnlichen (unten) und LKW-ähnlichen (oben) Fahrzeugen hinsichtlich Einbruchdauer und Einbruchtiefe. Beispielsweise kann bei der Durchfahrt eines LKW mit Anhänger ein kurzzeitiger Anstieg in der Mitte des Signaleinbruchs auftreten. Diese Tatsache führt zu der Annahme, dass Fahrzeugeigenschaften wie Bauform, Bauhöhe u.ä. die Signalverläufe stark beeinflussen. Im Verlauf der Datenaufbereitung werden aus solch charakteristischen Signalverläufen Attribute abgeleitet (Feature Extraktion). Ein weiteres relevantes Merkmal der Rohdaten sind die Signalüberschwinger, die unmittelbar vor und nach der Durchfahrt eines Fahrzeuges durch das Messsystem auftreten. Diese Merkmale sind in erster Linie für die Klassifikation mit Rohdaten von Bedeutung.

**Abbildung 42:** Typische Charakteristika beispielhafter RSSI-Zeitverläufe bei der Durchfahrt von PKW- (unten) und LKW-ähnlichen (oben) Fahrzeugen durch das Messsystem.

Um die charakteristischen Veränderungen des Funkfeldes bei der Durchfahrt verschiedener Fahrzeugtypen mit möglichst wenigen Merkmalen ausreichend präzise untersuchen zu können, werden aus den empfangenen RSSI-Zeitverläufen Features (Attribute) abgeleitet. Insgesamt wurden sechs unterschiedliche Features (siehe Tabelle 5) untersucht.

**Tabelle 5:** Kompletter Feature Vektor bestehend aus sechs extrahierten Features

Feature 1	Feature 2	Feature 3	Feature 4	Feature 5	Feature 6
Länge	Einbruchdauer	Einbruchtiefe	Einbruchanzahl	Wölbung	Einbruchpegeldifferenz

### Fahrzeuglänge

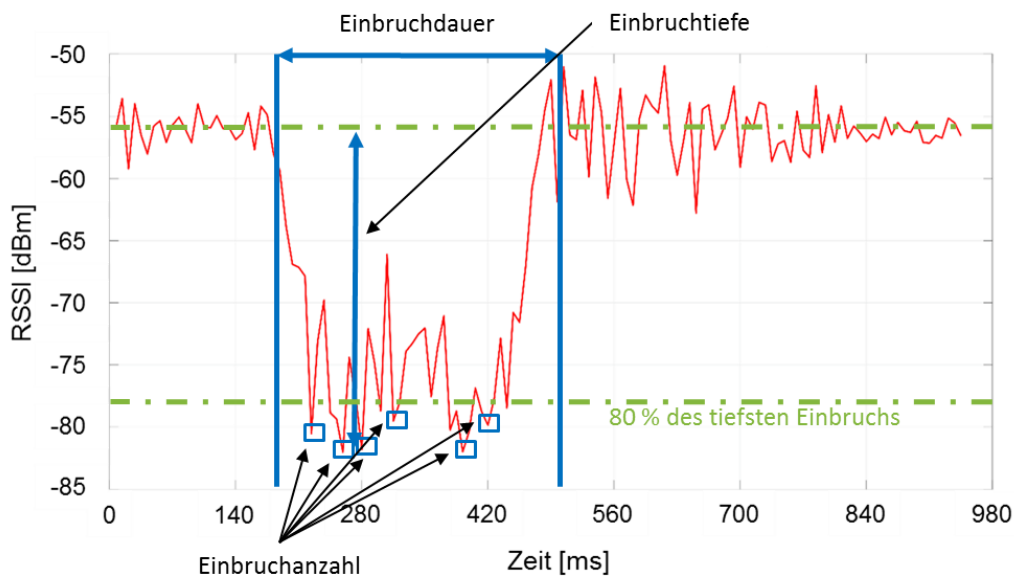
Die geschätzte Länge eines Fahrzeuges wird unter Zuhilfenahme der Signalstärkeeinbrüche aller Querverbindungen wie folgt berechnet

$$\hat{v} \left[ \frac{m}{s} \right] = \frac{s [m]}{t_{EA} [s]} .$$

Dabei ist  $\hat{v}$  die geschätzte Geschwindigkeit des Fahrzeugs,  $s$  die Strecke zwischen zwei Leitpfosten und  $t_{EA}$  die Zeitdifferenz zwischen zwei Einbrüchanfängen. In diesem Fall werden für drei Teilstrecken individuelle Geschwindigkeitsberechnungen durchgeführt: zwischen erstem und mittlerem, zwischen mittlerem und letztem sowie zwischen erstem und letztem Leitpfostenpaar. Danach wird der Mittelwert aus den individuell berechneten Geschwindigkeiten bestimmt. Ebenfalls lässt sich die Länge des Fahrzeugs abschätzen mit

$$\hat{l} [m] = \hat{v} \left[ \frac{m}{s} \right] t_{ED} [s].$$

In diesem Fall entspricht  $\hat{l}$  der geschätzten Länge des Fahrzeugs,  $\hat{v}$  ist die vorher geschätzte Geschwindigkeit und  $t_{ED}$  die Einbruchdauer einer Verbindung. Da das System aus mehreren Verbindungen besteht, wird zur präziseren Bestimmung der Fahrzeuglänge der Mittelwert aus den verbindungsabhängigen Einbruchdauern der Verbindungen 1,5 und 9 verwendet.



**Abbildung 43:** Schematische Darstellung zur Ableitung der Features Einbruchdauer, -tiefe und –anzahl anhand eines beispielhaften RSSI-Zeitverlaufes



### Einbruchdauer, -tiefe, -anzahl

Die Ableitung der Features Einbruchdauer, -tiefe und -anzahl aus den Rohdaten ist in Abbildung 43 schematisch dargestellt. Zu Beginn wird das Messsystem auf den bei einer Leermessung vorherrschenden, mittleren RSSI-Wert kalibriert. Wird bei den RSSI-Messungen ein von diesem Kalibrierungswert abgeleiteter, empirisch bestimmter Schwellwert (98% der Signalstärke des Kalibrierungswertes) unterschritten, so wird dieser Zeitpunkt als Einbruchanfang gedeutet. Analog wird die Überschreitung desselben Schwellwertes nach einem Signalstärkeeinbruch als Einbruchende interpretiert. Folgerichtig kann aus der zeitlichen Differenz zwischen Einbruchende und –anfang die Einbruchdauer abgeleitet werden.

Die Differenz aus dem im Vorfeld bestimmten Kalibrierungswert und dem tiefsten Einbruch ergibt die Einbruchtiefe. Alle Einbrüche, deren Einbruchtiefe mindestens 80% der größten Einbruchtiefe beträgt, werden für die Berechnung der Einbruchanzahl berücksichtigt.

### Wölbung

Um die Häufigkeitsverteilung der RSSI-Werte während eines Einbruchs zu bewerten, wird als statistisches Mittel die Wölbung berechnet. Die Wölbung  $w$

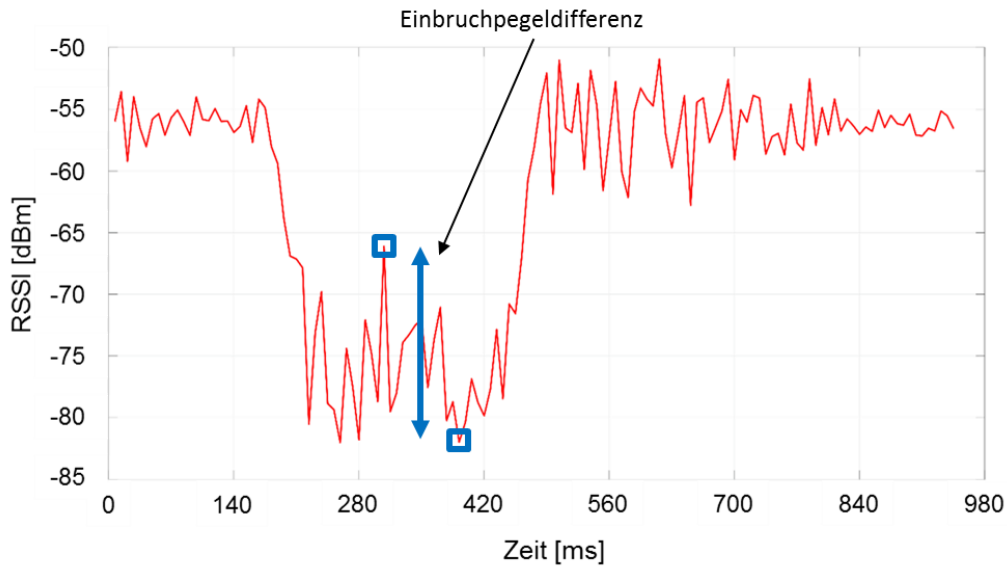
$$w = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^4$$

mit einer empirischen Häufigkeitsverteilung von  $n$  Werten berechnet sich aus den Beobachtungswerten  $x_i$ , dem arithmetischen Mittelwert  $\bar{x}$  mit

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \right)$$

und der Standardabweichung  $s$  mit

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}.$$

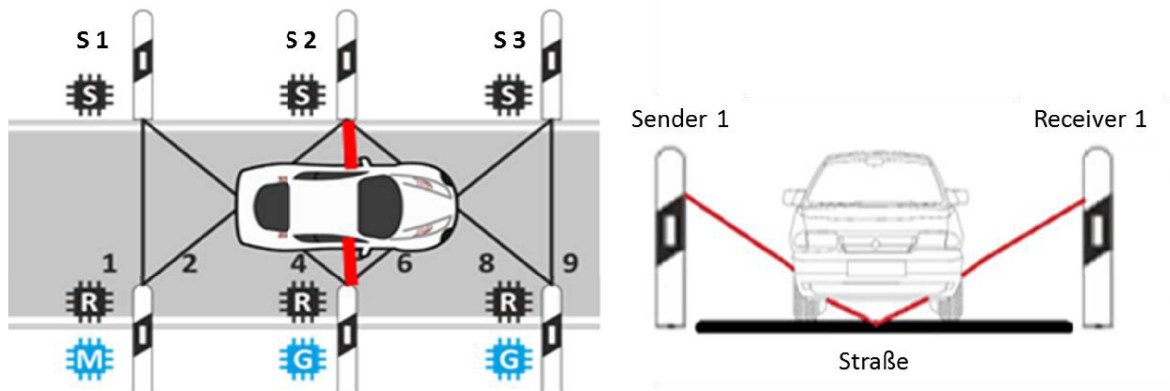


**Abbildung 44:** Differenz zwischen maximalem und minimalem Signalpegel während des Einbruchs (Einbruchpegeldifferenz)

Die Wölbung  $w$  erlaubt die Aussage, ob eine Verteilung der RSSI-Werte steil- oder flachgipflig ist. Bei genauer Betrachtung der RSSI-Verläufe fällt eine starke Fluktuation der RSSI-Werte während des Einbruchs auf (siehe Abbildung 44). Der Grad der Fluktuation korreliert hierbei mit der Bauhöhe des Fahrzeuges.

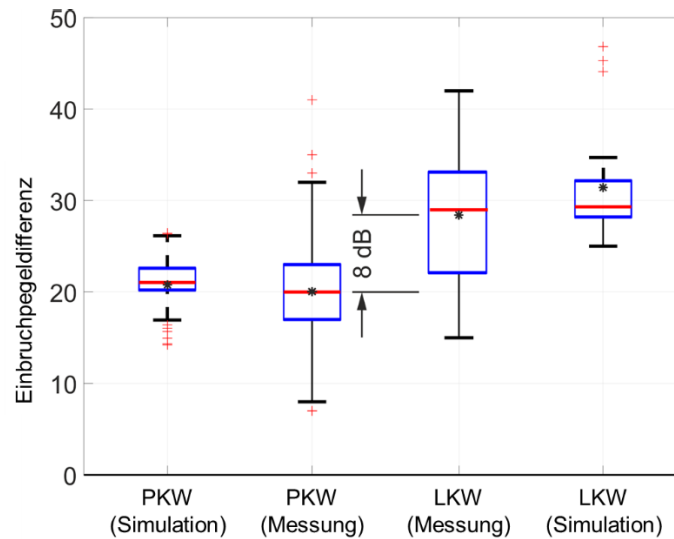
### Einbruchpegeldifferenz

Je größer der Abstand des Fahrzeugbodens zur Fahrbahnoberfläche ist, desto intensiveren Schwankungen ist das Empfangssignal unterworfen. Somit stellt die Differenz aus Maximum und Minimum während des Einbruchs die Einbruchpegeldifferenz dar, die sich u.a. aus Reflexionen an der Fahrbahnoberfläche ergibt (siehe Abbildung 45).



**Abbildung 45:** Schematische Darstellung des an der Straßenoberfläche reflektierten Signals von Querverbindungen als eine Ursache von Einbruchpegeldifferenzen während der Abschattung durch ein Fahrzeug

In Abbildung 46 wird die Einbruchpegeldifferenz von PKW und LKW anhand von Messdaten und Simulationsergebnissen verglichen. Dabei liegt die von LKW hervorgerufene Einbruchpegeldifferenz um etwa 8 dB höher als diejenige von PKW.



**Abbildung 46:** Vergleich der Einbruchpegeldifferenzen von PKW und LKW anhand von Messdaten und Raytracing-Ergebnissen

Mit Hilfe dieser Attribute soll der Detektor komplexe Aufgaben als sog. Labels bestimmen und lösen. Dabei wird zwischen folgenden Eigenschaften unterschieden:

- Fahrtrichtungs- und Geschwindigkeitserkennung von Fahrzeugen
- Fahrzeugzählung (insbesondere auch auf mehrspurigen Straßen)
- Fahrzeugtypenklassifizierung mit Fahrzeuglänge (z. B. PKW, LKW, PKW mit Anhänger)

**Tabelle 6:** Auflistung wesentlicher Merkmalsvektoren für die Fahrzeugklassifikation

Gruppe	Bestandteile des Merkmalvektors
RSSI-Zeitreihen	RSSI-Verläufe einer Verbindung (separate Verbindungsanalyse)
	Akkumulation von RSSI-Verläufen (Verbindungen 1,5,9)
	Akkumulation von RSSI-Verläufen (Verbindungen 1,2,4,5,6,8,9)
	RSSI-Verläufe einer Verbindung mit unterschiedlichem Längeninformationsanteil (variabel, 1/2, 1/3, 1/9)
Feature Vektor	Feature Vektor mit 6 Elementen (separate Verbindungsanalyse)
	Akkumulation von 6-elementigen Feature Vektoren (Verbindungen 1,5,9)
	Akkumulation von 6-elementigen Feature Vektoren (Verbindungen 1,2,4,5,6,8,9)

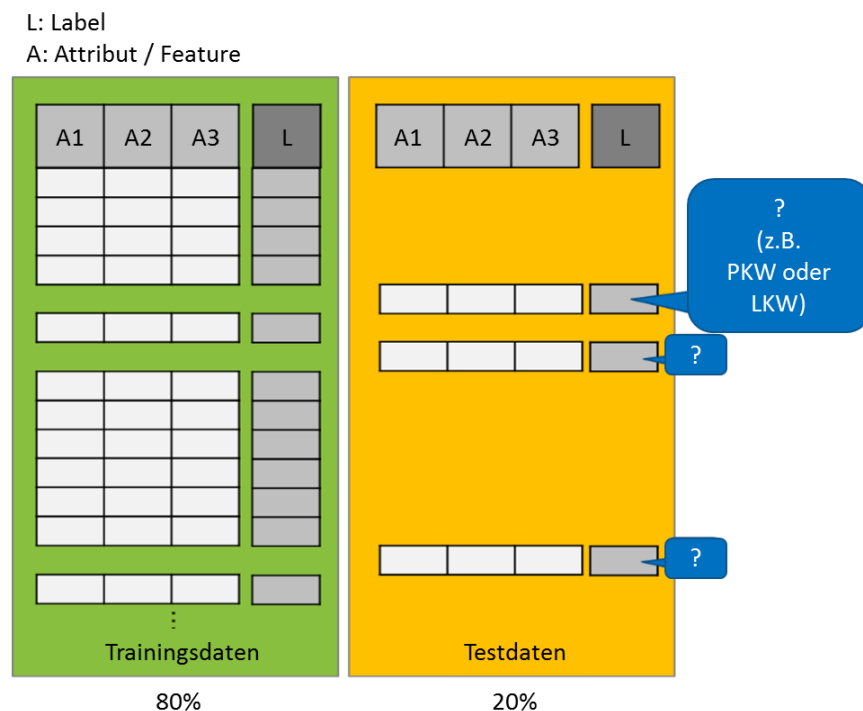
Zuerst wurde die Tool Chain zur Aufzeichnung von Daten, Datenaggregation am Master-Knoten zur Offline-Auswertung, Einlesen der Messdaten zur Vorbereitung des maschinellen Lernens und Erlernen von Beispielmodellen auf Basis der Daten aufgebaut.

Eine Vielzahl von Merkmalsvektoren wurde untersucht, um eine möglichst hohe Klassifikationsgenauigkeit zu erzielen. Die untersuchten Vektoren können in zwei Hauptgruppen aufgeteilt werden. Während die erste Gruppe aus Rohdaten besteht, setzen sich die Merkmalsvektoren der zweiten Gruppe aus abgeleiteten Features zusammen (siehe Tabelle 6).

Aufgrund der Tatsache, dass die Länge der aufgezeichneten RSSI-Zeitreihen sowohl mit der Geschwindigkeit als auch mit der Länge eines jeden Fahrzeuges korreliert, ist im Falle der Durchführung einer Fahrzeugklassifikation auf Basis der Rohdaten eine Längen Anpassung der Zeitreihen (Padding) notwendig.

Zum Auffüllen der Rohdaten auf eine konsistente Länge wurde nicht nur der zuletzt aufgezeichnete RSSI-Wert, sondern auch die Fahrzeuglängeninformation verwendet. Hierbei wurden unterschiedliche Strategien bezüglich des Anteils vom Padding an der Gesamtinformation untersucht. Konkret wurden Konstellationen aus RSSI-Zeitreihen und Längeninformationen sowohl mit einem variablen als auch mit einem fixen Verhältnis von 1/9, 1/3 und 1/2 analysiert. Bei einer weiteren Analyse wurden mehrere Zeitreihen verschiedener Verbindungen zu einem Merkmalsvektor akkumuliert. Die für die wesentlichen Merkmalsvektoren herangezogenen Komponenten bzw. berücksichtigten Verbindungen sind in Tabelle 6 aufgeführt.

Die erhobenen Messdaten dienen zum Erlernen von Klassifikationsmodellen und zur Überprüfung der Klassifikationsgenauigkeit. Um die Ausgeglichenheit unterschiedlicher Fahrzeugtypen im Datensatz zu überprüfen, wird eine Kreuzvalidierung eingesetzt. Ein Teil der aufgezeichneten Messdaten dient zum Erlernen des Modells, die restlichen Daten werden zur Prüfung der Klassifikationsgenauigkeit genutzt (siehe Abbildung 47). Zur Evaluierung der tatsächlichen Klassifikationsgenauigkeit und Performance werden anschließend 100 Klassifikationsdurchläufe durchgeführt



**Abbildung 47:** Veranschaulichung der Funktionsweise einer Kreuzvalidierung (Split Validation, 80%)

In Tabelle 7 sind die Ergebnisse der Kreuzvalidierung für alle vier Klassifikatoren bei Einsatz der Rohdaten des genutzten Datensatzes aufgeführt. Die niedrige Varianz der Ergebnisse lässt auf eine gleichmäßige Verteilung des Datensatzes schließen.

**Tabelle 7:** Ergebnisse einer Kreuzvalidierung für die Klassifikationsverfahren DT, kNN, SVM und NN bei ausschließlicher Berücksichtigung der Messdaten von Verbindung 1.

Merkmalsvektor	DT	kNN	SVM	NN
Rohdaten	97,68±0,5%	99,17±0,4%	98,65±0,4%	98,47±0,4%

#### 4.1.5 LEISTUNGSBEWERTUNG DER ENTSCHEIDUNGSGRUNDLAGEN

Für die Wahl der optimalen Kombination aus Entscheidungsgrundlagen und Art der Merkmalsvektoren (Rohdaten, Feature Vektoren) wurden verschiedene Konstellationen ausgewertet und deren Ergebnisse verglichen. In den folgenden Unterkapiteln wird die Leistungsbewertung anhand der Klassifikationsgenauigkeit durchgeführt.

##### 4.1.5.1 VERGLEICH DER KLASSIFIKATIONSGENAUIGKEIT: ROHDATEN VS. AUFBEREITETE MESSDATEN

Als erster Ansatz zur Steigerung der Klassifikationsgenauigkeit wurde eine Aufbereitung der Rohdaten untersucht. Unter der Annahme, dass kein Zusammenhang zwischen Fahrzeugtyp und Geschwindigkeit besteht, wurden die Daten zunächst auf eine mittlere Geschwindigkeit normiert (Geschwindigkeitsbereinigung).

Bei der Geschwindigkeitsbereinigung wurden die RSSI-Zeitreihen der Rohdaten durch Interpolation bzw. Extrapolation auf eine bestimmte Fahrzeuggeschwindigkeit normiert und mittels Tiefpassfilter (Moving Average Filter) geglättet. Aus den in Tabelle 8 dargestellten Klassifikationsergebnissen geht für die ausgewählten Entscheidungsgrundlagen eine niedrigere Klassifikationsgenauigkeit bei Verwendung der aufbereiteten Rohdaten hervor, weswegen für alle folgenden Arbeiten auf eine Normierung und Glättung der Daten verzichtet wurde.

**Tabelle 8:** Vergleich der Klassifikationsgenauigkeit bei Verwendung von Rohdaten und aufbereiteten Rohdaten (geschwindigkeitsbereinigt und geglättet)

Inputdaten	DT [%]	kNN [%]	SVM [%]	NN [%]
Rohdaten	97,98	99,02	98,71	98,11
Aufbereitete Rohdaten	97,54	98,78	98,05	96,49

##### 4.1.5.2 AUFFÜLLEN DER ROHDATEN MIT FAHRZEUGLÄNGENINFORMATION

In Abhängigkeit der Beschaffenheit der Inputdaten kann beim Einsatz maschineller Lernverfahren eine Datenaufbereitung (Preprocessing) notwendig sein. Dieser Preprocessing-Schritt sieht bei der Nutzung von RSSI-Zeitreihen als Eingabe für die Fahrzeugklassifikation ein Auffüllen jener auf eine einheitliche Vektorlänge vor. Hierbei können unterschiedliche Strategien wie die zum Auffüllen verwendete Information (z.B. zuletzt gemessener RSSI-Wert, Fahrzeuglänge etc.) und deren Anteil an der Gesamtlänge des resultierenden Vektors umgesetzt werden. Um die Auswirkungen verschiedener Datenaufbereitungsansätze auf das finale Klassifikationsergebnis zu quantisieren, wurden unterschiedliche Auffüllfaktoren ausgewertet (Tabelle 9). Hierbei geben die Quotienten den jeweiligen Anteil der Paddingsequenz am gesamten Merkmalsvektor für die Klassifikation an. Im Fall des variablen Paddings wurden alle RSSI-Zeitreihen in etwa auf die Länge der längsten RSSI-Zeitreihe aufgefüllt. Unabhängig von der gewählten Paddingvariante, liegt die Klassifikationsgenauigkeit für alle unter-

suchten Verfahren über 97 %, wobei das variable Padding die besten Ergebnisse mit Ausnahme der kNN erzielt.

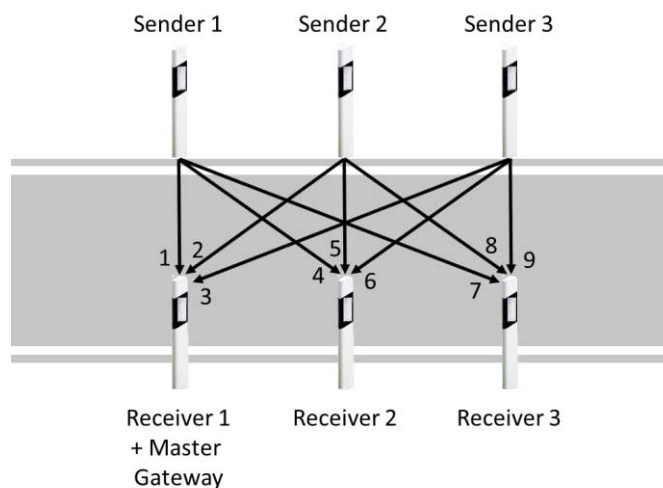
Dies ist auf die Funktionsweise der kNN zurückzuführen, die einen punktweisen Abgleich von Merkmalsvektoren und vorgegebenen RSSI-Zeitreihen durchführt und das Padding mit der Fahrzeuglängeninformation dadurch, abhängig von der Länge der ursprünglichen RSSI-Zeitreihe, einen unterschiedlich starken Einfluss auf die Klassifikation ausübt. Da das Padding mit variabler Sequenzlänge bei allen Verfahren im Mittel zu den besten Klassifikationsergebnissen führte, wird im Folgenden nur noch diese Variante betrachtet.

**Tabelle 9:** Klassifikationsergebnisse bei Verwendung unterschiedlicher Paddingvarianten zur Auffüllung der RSSI-Zeitreihen mit Fahrzeuglängeninformationen

Anteil der Paddingsequenz am Merkmalsvektor	DT [%]	kNN [%]	SVM [%]	NN [%]
variabel	98,30	98,86	99,12	99,15
1/2	98,08	99,11	98,70	98,46
1/3	97,81	98,90	98,54	98,62
1/9	97,74	98,88	98,68	98,68

#### 4.1.5.3 KLASSIFIKATION BEI AUSWERTUNG EINER FUNKVERBINDUNG

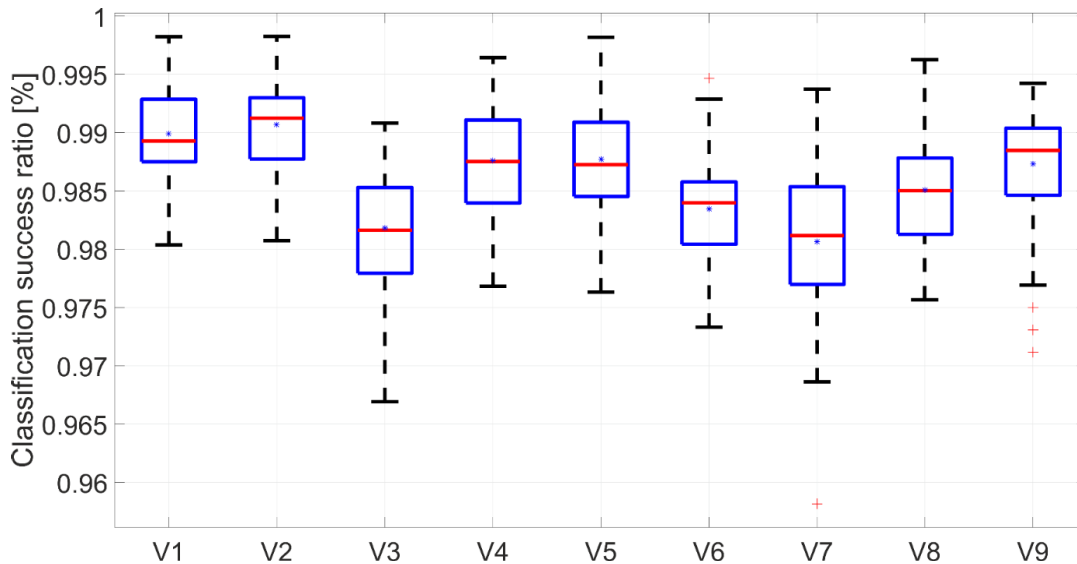
Sofern für die Klassifikation nur RSSI-Zeitreihen und daraus extrahierte Features einzelner Querverbindungen herangezogen werden, sollte die Wahl auf die Verbindung fallen, mit deren Messergebnissen sich die höchsten Klassifikationsergebnisse erzielen lassen. Infolgedessen wurden die aufgezeichneten RSSI-Zeitreihen bzw. daraus abgeleiteten Features aller Verbindungen separat hinsichtlich ihrer Eignung für die Fahrzeugklassifikation geprüft. Einen Überblick über die Beschaffenheit des Messsystems mit den jeweiligen Verbindungen gibt Abbildung 48.



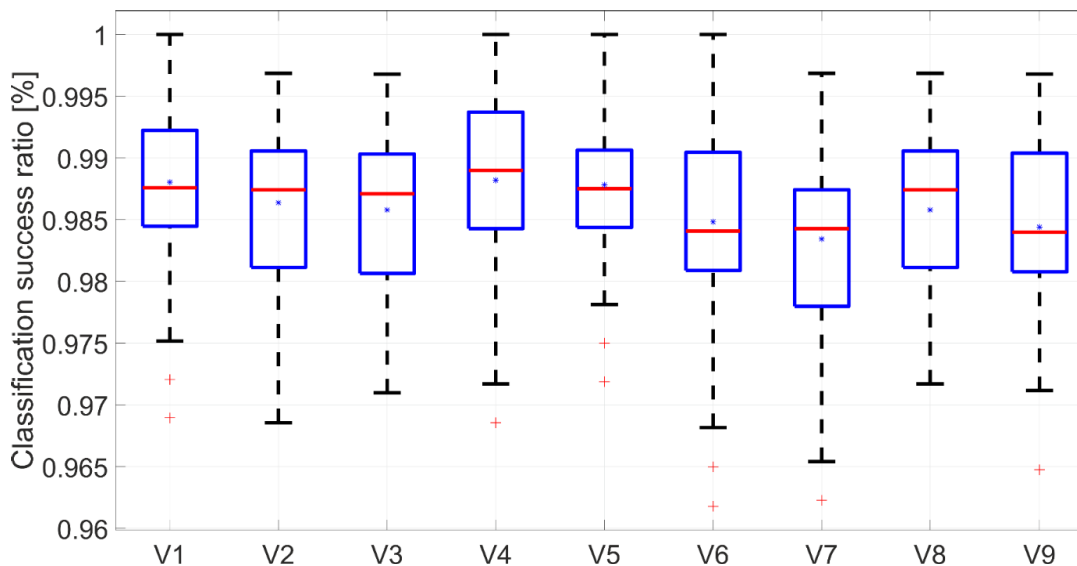
**Abbildung 48:** Aufbau des Messsystems bestehend aus drei Sende- und drei Empfangseinheiten

In Abbildung 49 und Abbildung 50 sind die Klassifikationsergebnisse der neun Funkverbindungen bei Verwendung von Feature Vektoren bzw. gepaddeten Rohdaten für 100 Klassifikationsdurchläufe als Boxplot dargestellt.

Mit Blick auf mittlere Klassifikationsgenauigkeit und Varianz sind die Messdaten von Verbindung 3 (Abbildung 49) und Verbindung 7 (Abbildung 49 und Abbildung 50) im Vergleich zu jenen der übrigen Verbindungen zwecks Fahrzeugklassifikation weniger geeignet. Der Grund hierfür liegt insbesondere in einem vergleichsweise geringen Signalpegel einbruch bei einer Fahrzeugdurchfahrt durch das Messsystem (s. Abbildung 51), welche auf eine größere räumliche Distanz der entsprechenden Sendee- und Empfangseinheiten zurückzuführen ist.



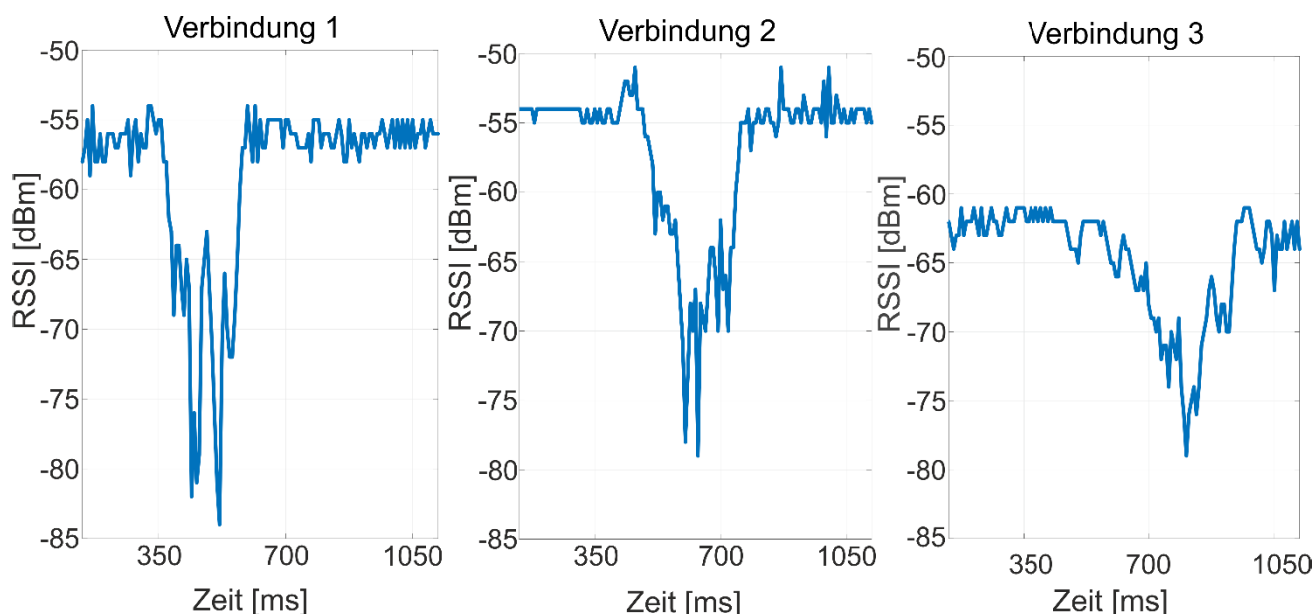
**Abbildung 49:** Boxplot über die Klassifikationsergebnisse verschiedener Funkverbindungen (Verbindung 1 bis 9 (V1-V9)) bei 100 Klassifikationsdurchläufen und der Nutzung von Feature Vektoren



**Abbildung 50:** Boxplot über die Klassifikationsergebnisse verschiedener Funkverbindungen (Verbindung 1 bis 9 (V1-V9)) bei 100 Klassifikationsdurchläufen und der Nutzung von mit Fahrzeuglängeninformatoren gepaddeten RSSI-Zeitreihen

Demgegenüber führt die Verwendung der Messdaten von Verbindung 1 durchweg zu den höchsten mittleren Klassifikationsergebnissen mit den geringsten Varianzen. Folglich wurden für die weiteren Untersuchungen ausschließlich die Messdaten von Verbindung 1 verwendet.





**Abbildung 51:** Vergleich der Signalpegeleinbrüche von Verbindung 1-3 bei einer Fahrzeugdurchfahrt durch das Messsystem

#### 4.1.5.4 KLASSIFIKATIONSERGEBNISSE BEI NUTZUNG VON MERKMALSVEKTOREN

Nachdem in Abschnitt 4.1.4 insgesamt zehn Merkmalsvektoren vorgestellt wurden, wurden vier Vektoren mit den besten Klassifikationsergebnissen für weitere Untersuchungen ausgewählt. Tabelle 10 führt die ausgewählten Merkmalsvektoren mitsamt der jeweils erzielten Klassifikationsergebnisse bei Nutzung des Testsets A (s. Tabelle 4) für RapidMiner Studio, Matlab bzw. Scikit-Learn auf.

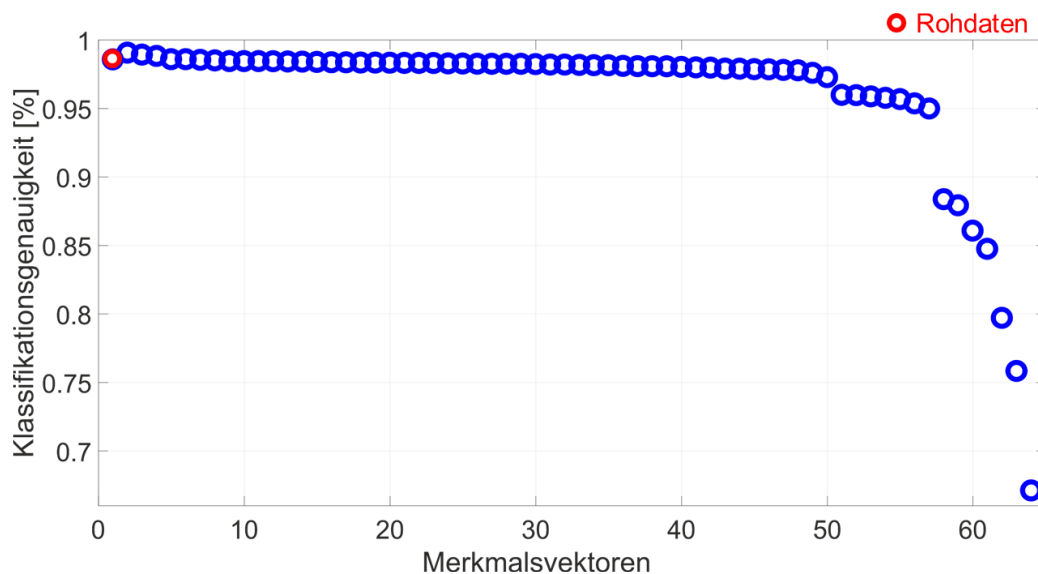
Dabei erreichen die Klassifikationsalgorithmen bei Verwendung von Feature Vektoren mindestens vergleichbare, zum Teil sogar bessere Ergebnisse als bei Nutzung von (gepadeten) Rohdaten. Zur Validierung dieses Ergebnisses wurden RapidMiner Studio und Matlab hinzugezogen.

**Tabelle 10:** Ergebnisse der vier besten Merkmalsvektoren bei 100 Durchläufen für Testset A (Tabelle 4).

Merkmalsvektor	RapidMiner Studio				Matlab			Scikit-Learn			
	DT [%]	kNN [%]	SVM [%]	NN [%]	kNN [%]	SVM [%]	NN [%]	DT [%]	kNN [%]	SVM [%]	NN [%]
Rohdaten V1	97,98	99,02	98,71	98,11	98,97	98,10	98,11	97,89	99,07	95,91	98,59
Rohdaten mit Längenauffüllung V1	98,69	98,76	99,05	98,96	98,86	99,12	99,15	98,51	98,91	97,96	98,88
FV eine Verbindung V1	98,73	98,94	99,13	99,11	98,72	98,80	99,06	98,61	98,99	96,03	99,05
FV Akkumulation V159	98,91	98,95	99,05	98,90	98,88	98,85	98,65	98,68	98,94	96,11	98,77

#### 4.1.5.5 VERGLEICH DER KLASSIFIKATIONSGENAUIGKEIT: FEATURE VEKTOREN VS. ROHDATEN

Um eine fundierte Aussage über die Eignung von Rohdaten und aufbereiteten Feature Vektoren zwecks Fahrzeugklassifikation treffen zu können, wurde eine Vielzahl an Kombinationen von Feature Vektoren und verschiedenen Parametrisierungen des Neuronalen Netzes untersucht. Die Wahl fiel auf das Neuronale Netz, da dieses in Kombination mit dem aus den Messdaten von Verbindung 1 abgeleiteten Feature Vektor das beste Klassifikationsergebnis liefert.



**Abbildung 52:** Vergleich der Klassifikationsgenauigkeit bei Nutzung eines Neuronalen Netzes mit Rohdaten bzw. verschiedenen Feature Vektoren als Eingabe

Abbildung 52 veranschaulicht die Klassifikationsergebnisse für die untersuchten Feature Vektoren und stellt sie der mit Rohdaten erreichbaren Klassifikationsgenauigkeit gegenüber. So kann auf Basis von Rohdaten und Feature Vektoren eine Klassifikationsgenauigkeit von ca. 98,60% erzielt werden. In Tabelle 11 werden die Klassifikationsergebnisse bei Verwendung von Rohdaten und, nach absteigender Klassifikationsgenauigkeit sortiert, alle untersuchten Feature Vektoren detailliert dargestellt. Auffällig ist, dass die Verwendung von Feature Vektoren zu besseren Klassifikationsergebnissen als der Gebrauch von Rohdaten führen kann.

Eine Genauigkeit von 99,06% erzielte das Neuronale Netz bei Nutzung des 6-elementigen Feature Vektors, der sich aus den Features Länge, Einbruchdauer, -tiefe, -anzahl, -pegeldifferenz und Wölbung zusammensetzt. Allerdings ermöglicht auch die Kombination einer geringeren Anzahl an Features ähnlich hohe Klassifikationsergebnisse bei einer gleichzeitigen Reduktion von Rechen- und Speicheraufwand. Beispielsweise erzielt das Neuronale Netz bei Verwendung eines zweielementigen Feature Vektors bestehend aus den Attributen Einbruchdauer und -tiefe eine mit 98,58% geringfügig niedrigere Klassifikationsgenauigkeit, bedarf dafür aber nur der Berechnung und der Speicherung zweier Features.

**Tabelle 11:** Zusammensetzung und erzielte Klassifikationsgenauigkeit der in *Abbildung 52* gezeigten Merkmalsvektoren

Merkmalsvektor Nummer (Abbildung 52)	Rohdaten	Länge	Einbruchdauer	Einbruchtiefe	Einbruchanzahl	Wölbung	Einbruchpegeldifferenz	Klassifikationsgenauigkeit [%]
1	X							98,56
2		X	X	X	X	X	X	99,06
3		X	X	X	X		X	98,91
4		X	X	X	X			98,82
5			X	X				98,58
6			X	X	X			98,58
7		X	X	X			X	98,53
8		X	X	X		X	X	98,49
9			X	X	X	X	X	98,44
10		X		X	X		X	98,44
11		X		X		X	X	98,44
12		X		X	X	X	X	98,43
13		X	X	X	X	X		98,41
14		X		X	X			98,40
15		X		X			X	98,38
16		X			X			98,35
17		X	X		X		X	98,35
18		X	X	X				98,33
19		X		X	X	X		98,33
20		X	X	X		X		98,32
21		X	X		X	X	X	98,31
22		X			X		X	98,30
23		X					X	98,30
24		X	X			X	X	98,27
25			X	X	X		X	98,26
26		X	X		X			98,25
27		X			X	X	X	98,24
28		X	X				X	98,24
29		X				X	X	98,24
30		X	X		X	X		98,21
31		X			X	X		98,19
32		X	X					98,19
33		X	X			X		98,16
34		X		X		X		98,14
35			X	X			X	98,14
36		X				X		98,09
37		X		X				98,07
38			X		X			98,06
39		X						98,06
40			X	X	X	X		98,02
41			X	X		X	X	97,98
42			X		X		X	97,98
43			X		X	X		97,89
44			X		X	X	X	97,79

Merkmalsvektor Nummer (Abbildung 52)	Rohdaten	Länge	Einbruchdauer	Einbruchtiefe	Einbruchanzahl	Wölbung	Einbruchpegeldifferenz	Klassifikationsgenauigkeit [%]
45			X				X	97,85
46			X	X		X		97,84
47			X					97,80
48			X			X	X	97,77
49			X			X		97,58
50				X	X	X	X	97,27
51					X		X	95,97
52					X	X	X	95,95
53				X	X		X	95,86
54				X	X	X		95,76
55					X	X		95,66
56				X	X			95,36
57					X			94,98
58				X		X	X	88,36
59				X			X	87,91
60						X	X	86,06
61							X	84,73
62				X		X		79,70
63				X				75,82
64						X		67,10

#### 4.1.5.6 KLASSIFIKATION NACH ZERTIFIZIERUNGSVORSCHRIFT

Laut der in Abschnitt 4.1.3 beschriebenen Zertifizierungsvorschrift soll die Fahrzeugtypenklassifikation auf Basis der Fahrzeuglänge erfolgen. Folglich wird, wie in Abschnitt 4.1.3 beschrieben, zwischen zwei Datensets (Testset B.1 und Testset B.2) mit unterschiedlichen Anforderungen an die Klassifikationsgenauigkeit unterschieden. Während für Testset B.1 eine Klassifikationsgenauigkeit von mindestens 99% erreicht werden muss, reicht eine Klassifikationsgenauigkeit von mindestens 80% im Fall von Testset B.2 (vgl. Tabelle 4) aus. Dabei soll der Anteil der Lieferwagen mindestens 5% des Gesamtdatensets (Testset B, ebd.) betragen. Der Anteil des vorliegenden Testsets B.2 am Gesamttestset B liegt mit 8,22% über der genannten Forderung.

In Tabelle 12 sind die Klassifikationsergebnisse der einzelnen Entscheidungsalgorithmen bei Nutzung von Rohdaten bzw. drei der im Vorfeld bestimmten Feature Vektoren aufgeführt. Bei genauer Betrachtung der Klassifikationsgenauigkeiten erreicht die SVM mit den Rohdaten das höchste Klassifikationsergebnis mit 99,47%, während das Neuronale Netz in diesem Fall mit 98,53% die geringste Klassifikationsgenauigkeit aufweist. Damit resultiert aus dieser Untersuchung eine maximale Differenz der Klassifikationsgenauigkeiten von 0,94%. Ein analoges Bild ergibt sich bei Betrachtung des Testsets B.2 (längenbasierte Unterscheidung von Lieferwagen), wo die SVM erneut die höchste und das NN die niedrigste Klassifikationsgenauigkeit zur Folge hat. Allerdings ist die Differenz der Klassifikationsgenauigkeiten mit 11,64% nun signifikant. Nichtsdestotrotz wird auch in diesem Fall die seitens der Zertifizierungsvorschrift definierte Vorgabe einer 80%-igen Klassifikationsgenauigkeit eingehalten. Die Unterschiede der Klassifikationsgenauigkeiten sind, wie in Tabelle 12 zu sehen, für die kNN, SVM und NN vernachlässigbar.

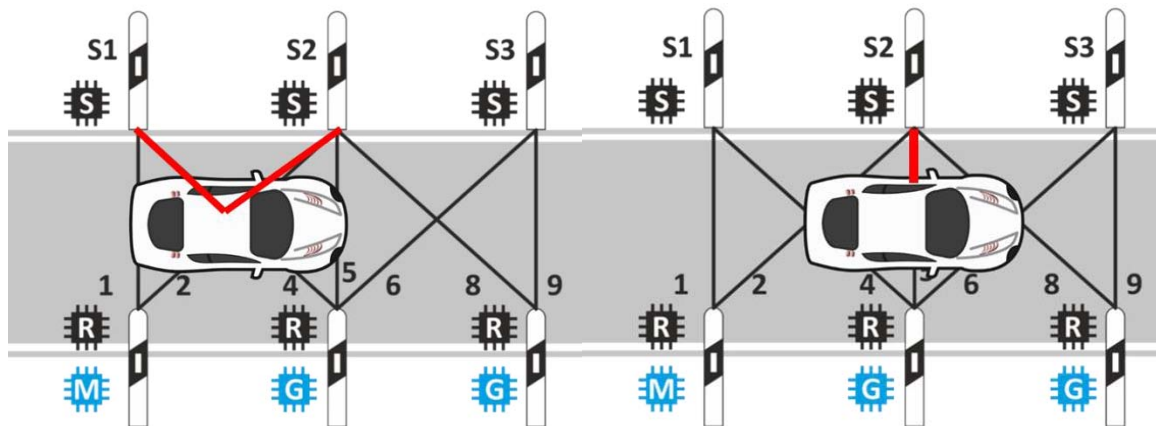
**Tabelle 12:** Klassifikationsgenauigkeiten bei Einsatz verschiedener Entscheidungsalgorithmen und Merkmalsvektoren bei Klassifikation nach Zertifizierungsvorschrift (vgl. Abschnitt 4.1.3). Hervorgehobene Klassifikationsgenauigkeiten erfüllen die Zertifizierungsvorgabe.

<b>Merkmalsvektor</b> (Nummerierung nach Abbildung 52)	<b>Maschinelles Lernverfahren</b>	<b>Zertifizierungstestset 1</b> [%]	<b>Zertifizierungstestset 2</b> [%]
<b>Vorgabe der Zertifizierungsvorschrift</b>		<b>99%</b>	<b>80%</b>
Rohdaten (1)	k-Nearest-Neighbor	98,62	<b>86,67</b>
	Support Vector Machine	<b>99,47</b>	<b>97,31</b>
	Neuronales Netz	98,53	<b>85,67</b>
Kompletter Feature Vektor (2)	k-Nearest-Neighbor	<b>99,03</b>	<b>91,69</b>
	Support Vector Machine	<b>99,38</b>	<b>90,06</b>
	Neuronales Netz	98,77	<b>90,65</b>
Feature Vektor 1: Länge, Einbruchdauer, Einbruchtiefe, Einbruchanzahl (4)	k-Nearest-Neighbor	98,91	<b>91,57</b>
	Support Vector Machine	<b>99,38</b>	<b>92,84</b>
	Neuronales Netz	98,90	<b>92,33</b>
Feature Vektor 2: Einbruchdauer, Einbruchtiefe (5)	k-Nearest-Neighbor	98,49	<b>91,22</b>
	Support Vector Machine	98,88	<b>88,82</b>
	Neuronales Netz	98,79	<b>92,41</b>

#### 4.1.6 KLASSIFIKATIONSERGEBNISSE BEI MEHRSPURIGKEIT

Die Fahrzeugdetektion an mehrspurigen Straßen ist anspruchsvoller als jene an einspurigen Verkehrswegen. Sind beispielsweise die für die Quer- und Diagonalverbindungen genutzten Sende- und Empfangseinheiten durch ein oder mehrere Fahrzeuge abgeschirmt und infolgedessen die Signalstärken der einzelnen Verbindungen stark gedämpft, so können diese Verbindungen nicht mehr für eine zuverlässige Fahrzeugdetektion bzw. –klassifikation genutzt werden.

Deshalb werden im Folgenden zwei auf der Auswertung von Signalreflexionen basierende Ansätze vorgestellt, die eine fahrspurspezifische Detektion und Klassifikation von Fahrzeugen erlauben. Diese Ansätze können sowohl alleinstehend als auch ergänzend zum bestehenden Klassifikationssystem eingesetzt werden. Für die Auswertung der Signalreflexionen werden sowohl die Signalinformationen zweier sich auf einer Straßenseite befindender Leitposten (Abbildung 53 und Abbildung 54, jeweils linker Teil) als auch die Messdaten eines einzelnen Leitpostens verwendet.



**Abbildung 53:** Auswertung von Signalreflexionen an einer Straßenseite zwischen zwei Leitpfosten (links) und von Signalreflexionen mit nur einem Leitpfosten (rechts)

Bei der Seitenreflexion wird das Signal von dem durchfahrenden Fahrzeug derart reflektiert, dass es vom benachbarten, auf der gleichen Straßenseite installierten Leitpfosten empfangen wird. Zudem ermöglicht die Struktur des Messsystems mit seinen parallel angeordneten Leitpfosten eine Ermittlung der ungefähren Länge eines vorbeifahrenden Fahrzeugs.

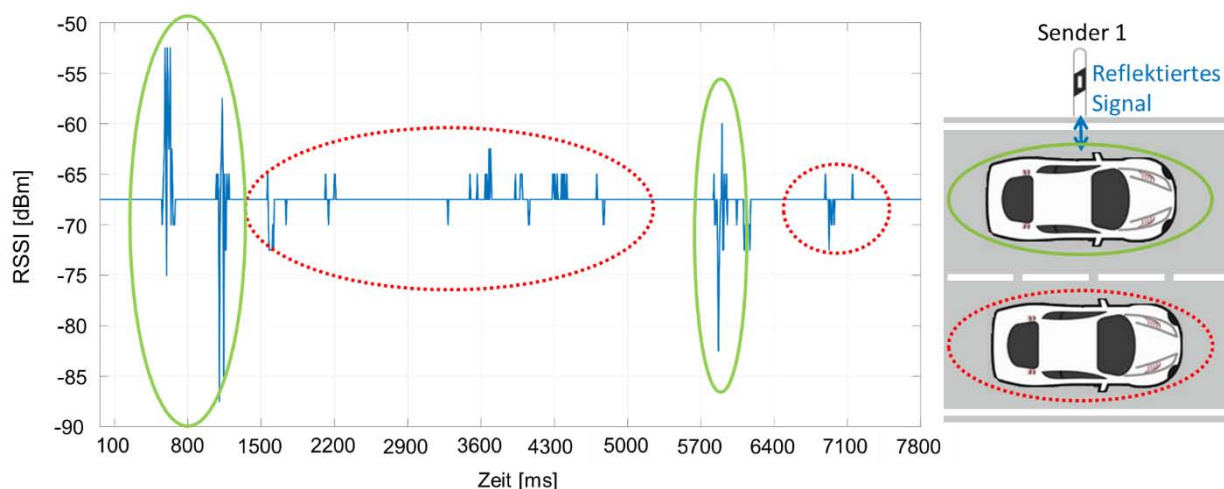


**Abbildung 54:** Messaufbau zur Untersuchung von Signalreflexionen an einer Straßenseite zwischen zwei Leitpfosten (links) und von Signalreflexionen mit nur einem Leitpfosten (rechts)

Für die separate Auswertung von Signalreflexionen mit nur einem Leitpfosten wird jeder Pfosten mit einer Sende- und Empfangseinheit bestückt. Der Aufbau ist im rechten Teil von Abbildung 53 und in Abbildung 54 (rechts) bei einer Außenmessung abgebildet. Die Eignung dieses Ansatzes zur fahrspurspezifischen Fahrzeugdetektion wird durch die beispielhafte Aufnahme mehrerer Fahrzeugdurchfahrten unterschiedlicher Fahrzeugtypen an einer zweispurigen Straße gezeigt (siehe Abbildung 55).

In Abhängigkeit der Fahrspur und der daraus resultierenden Distanz zum Leitpfosten ergeben sich unterschiedliche Signalstärken für das reflektierte Signal. Diese sind in der Abbildung grün (kleine Distanz zum Leitpfosten) bzw. rot und punktiert (größere Distanz) hervorgehoben. Hierbei ergeben sich deutliche Unterschiede in Bezug auf die Signalstärke, sodass eine fahrspurspezifische Detektion von Fahrzeugen auch auf einer mehrspurigen Straße möglich ist.





**Abbildung 55:** An einem Leitpfosten gemessene Signalstärke bei Durchfahrt mehrerer Fahrzeuge an einer zweispurigen Straße

Laut dem Zertifizierungsprozess der Zentralstelle für Verkehrsmanagement der Autobahndirektion Südbayern zählt die Fahrzeugdetektion und –klassifikation auf mehrspurigen Straßen zu den Sondersituationen. Folglich liegt die zu erzielende Klassifikationsgenauigkeit bei einem solchen Szenario mit 95,8% deutlich unter der Zielmarke von über 99% im Falle der Fahrzeugklassifikation auf einspurigen Straßen. Für den Zertifizierungsprozess bedeutet dies, dass bei dem Test von 120 Sondersituationen maximal fünf falsche Klassifikationsergebnisse auftreten dürfen. Im Zuge der Prüfung von Sondersituationen wird die Leistungsfähigkeit des Detektions- und Klassifikationssystems unter anderem bei der simultanen Durchfahrt mehrerer Fahrzeuge oder aber bei im System parkenden Fahrzeugen untersucht. Aus diesem Grund ist neben der Auswertung der Signalstärkeinformationen der Querverbindungen auch die Analyse der Signalreflexionen obligatorisch.

Tabelle 13 enthält die mittels Auswertung von Signalreflexionen gewonnenen Klassifikationsergebnisse für einen vergleichsweise kleinen Datensatz mit 104 Fahrzeugdurchfahrten für die Evaluierung von Seitenreflexionen bzw. 58 Durchfahrten für die Messung mit nur einem Leitpfosten. Für diesen Datensatz wird das beste Ergebnis (93,26%) bei Einsatz des Neuronalen Netzes und bei Verwendung extrahierter Fahrzeuglängeninformationen erreicht. Zu beachten ist, dass diese Untersuchung aufgrund des vergleichsweise kleinen Datensatzes als ein erster Ansatz zu verstehen ist, dessen Eignung mit einem größeren Datensatz validiert werden muss.

**Tabelle 13:** Klassifikationsgenauigkeiten bei Auswertung von Seitenreflexionen und Reflexionen an einem Leitpfosten

Ansatz	kNN [%]	SVM [%]	Neuronales Netz [%]
Seitenreflexion (Rohdaten)	75,63	80,68	84,68
Seitenreflexion (Fahrzeuglänge)	91,21	90,21	93,26
Einzelner Leitpfosten (Rohdaten)	89,64	89,55	91,45

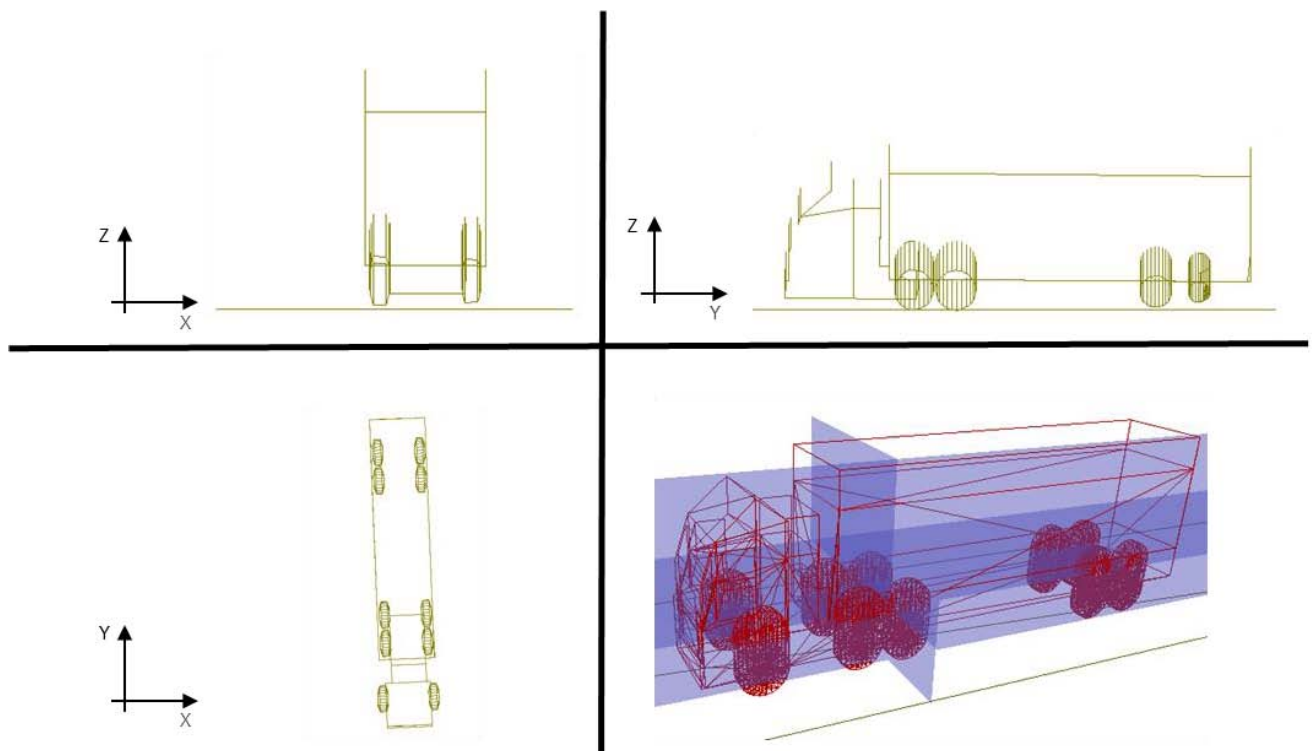


## 4.2 AUFBAU EINES SIMULATIONSUMFELDES FÜR RADIOTOMOGRAPHIE (AP2)

Die Generierung eines ausreichend großen Datensatzes an realen Messdaten zur Leistungsbewertung der Entscheidungsalgorithmen für die Erkennung von Fahrzeugen unterschiedlicher Art, der sowohl gewöhnliche Durchfahrten von Fahrzeugen als auch Sondersituationen beinhaltet, erweist sich als äußerst aufwendig. Folglich war angedacht, insbesondere für Sondersituationen mittels Raytracing-Simulationen erzeugte Messdaten zu verwenden. Beim Raytracing handelt es sich um eine Methodik der Strahlenverfolgung, die eine Untersuchung diverser Ausgangssituationen in Bezug auf mehrspurige Fahrbahnen und unterschiedliche Fahrzeugklassen und -typen erlaubt. Auf diese Weise kann eine Validierung der Leistungsfähigkeit verschiedener Entscheidungsverfahren zwischen real gemessenen und analytisch ermittelten Daten durchgeführt werden. Darüber hinaus ist dank des Raytracings eine weitere Optimierung der Kommunikationskomponenten im Messsystem entsprechend der Ausbreitungscharakteristiken möglich. In den folgenden Unterkapiteln wird auf die Modellierung von Umgebung und Fahrzeugen als vorbereitende Maßnahme für das abschließende Raytracing und auf die eigentliche Simulationdurchführung eingegangen.

### 4.2.1 METHODIK UND WERKZEUGE

Im Vorfeld der Strahlenverfolgung muss das zu untersuchende Szenario in Gestalt von Umgebung und Fahrzeugen mitsamt einer entsprechenden Fahrdynamik abgebildet werden. Bei diesem Schritt nehmen Detail- und Freiheitsgrade eine fundamentale Rolle ein.

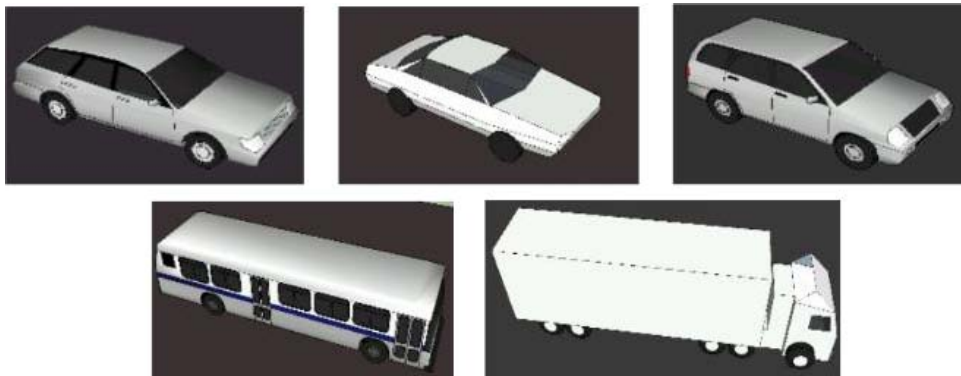


**Abbildung 56:** Drahtgittermodell einer Sattelzugmaschine mit Auflieger aus vier typischen Ansichten

Eine unzureichende Modellierung von Umgebung und Verkehrsteilnehmern (u.a. Fahrzeugform und Fahrverhalten) resultiert unter Umständen in einer Untauglichkeit der Ergebnisse zur Validierung der real gemessenen Daten. Im Gegensatz dazu bedeutet ein zu hoher Detailgrad einen zusätzlichen enormen Aufwand in Bezug auf Modellierung und Berechnungsdauer. Folglich muss bei der Modellierung ein Kompromiss gefunden werden, der die Aussagekraft der Simulationsergebnisse bei einem überschaubaren Arbeits- und Rechenaufwand sicherstellt.

Abbildung 56 zeigt exemplarisch das Drahtgittermodell einer Zugmaschine mit Sattelaufleger aus vier typischen Ansichten. Im Anschluss an die Erstellung des Drahtgittermodells folgt die Parametrisierung der plastischen Objekte. Um Objekten gemeinsame oder individuelle Eigenschaften komfortabel zuweisen zu können, werden diese in Objektgruppen formiert. Diese Gruppen erlauben eine einheitliche Modellierung von dynamischem Verhalten (Translation, Rotation, Geschwindigkeit) und die Definition von Materialeigenschaften (Material, Dicke, elektrische Leitfähigkeit etc.). Auf diese Weise können möglichst realistische Szenarien in der Simulationsumgebung abgebildet werden.

Nachdem die Objektmodellierung abgeschlossen ist, folgt die Parameterdefinition des Kommunikationssystems. Hierfür wird das zuvor modellierte Szenario um kommunikationsrelevante Aspekte (u.a. Positionierung und Antennencharakteristik von Sende- und Empfangsantennen) ergänzt. In Abhängigkeit der gewählten örtlichen und zeitlichen Auflösung muss die Strahlenberechnung ggf. für eine Vielzahl an Positionen durchgeführt werden, was sich negativ auf die Rechenzeit auswirkt. Mit Abschluss der Parametrisierung von Kommunikationssystem und Umgebungsszenario kann die eigentliche Strahlenberechnung ausgeführt werden.



**Abbildung 57:** Beispielhafte 3D-Modelle untersuchter Fahrzeugtypen in Raytracing-Simulation

Im Rahmen dieses Projektes wurden für eine Vielzahl von Fahrzeugtypen und unterschiedlichen Szenarien Untersuchungen mittels Strahlenverfolgung durchgeführt. Eine beispielhafte Auswahl der hierfür verwendeten 3D-Fahrzeugmodelle zeigt Abbildung 57. Im nächsten Abschnitt werden die Ergebnisse eines beispielhaften Szenarios für unterschiedliche Fahrzeugtypen diskutiert. Die Parametrisierung dieses Beispielszenarios ist in Tabelle 14 zu finden. Abbildung 58 gibt einen Überblick über die allgemeine Beschaffenheit dieses Beispielszenarios und veranschaulicht die Empfangsleistung einer von Sender 2 ausgehenden und durch ein Fahrzeug abgeschatteten Funkverbindungen für den durch ein rotes Rechteck gekennzeichneten Empfangsbereich.

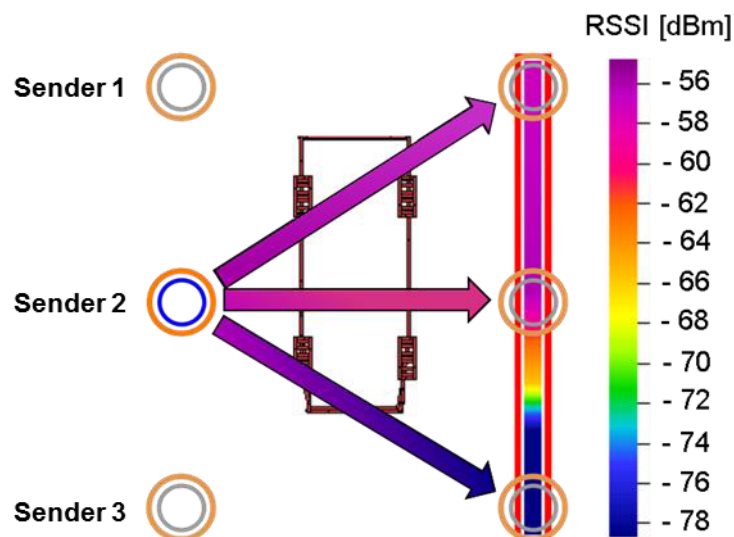
#### 4.2.2 ANWENDUNG, VALIDIERUNG UND ERKENNTNISGEWINN

Im Sinne der Vergleichbarkeit der Feldstärken einzelner Funkverbindungen wurde der Aufbau dieses Szenarios für alle Simulationsdurchläufe beibehalten. Lediglich die 3D-Fahrzeugmodelle wurden für

jeden Simulationsdurchlauf ausgetauscht und in einem vergleichbaren Abstand zu Sendeantenne und Empfangsfeld positioniert.

**Tabelle 14:** Parameter des Beispielszenarios

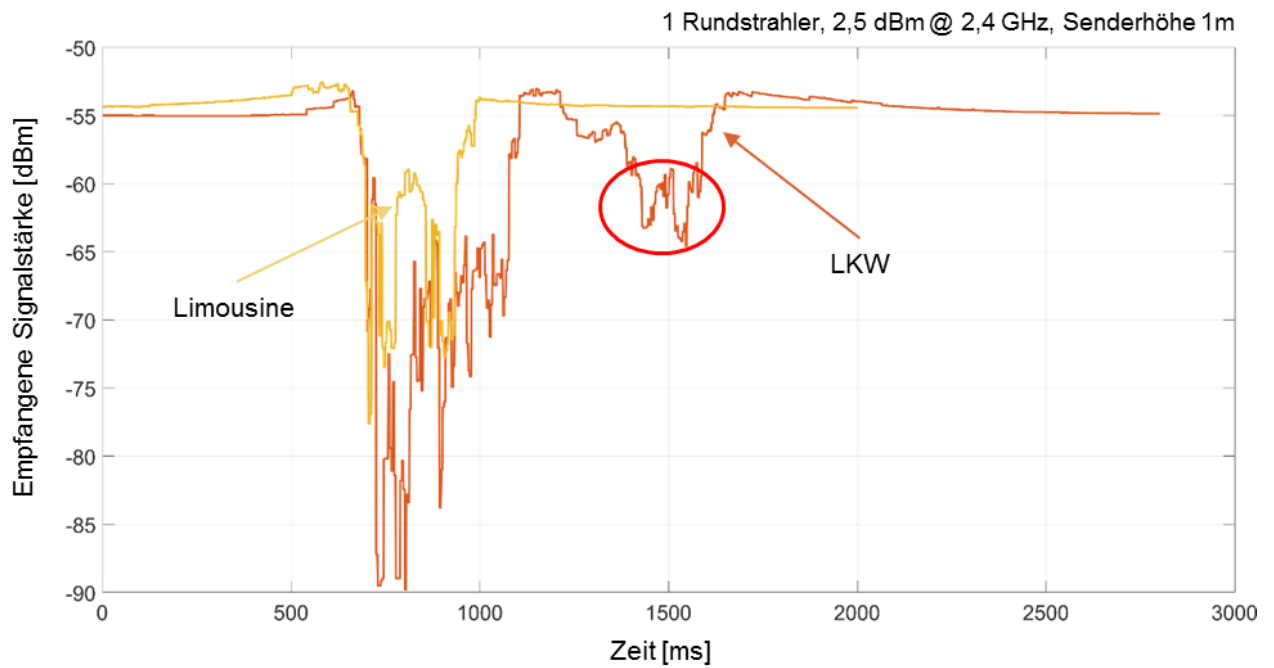
Parameter	Wert
Fahrzeugtyp	Limousine, LKW, SUV, Transporter
Material	Metall (5mm)
Geschwindigkeit	25 km/h
Antennentyp	Rundstrahler
Sendeleistung	2,5 dBm
Frequenz	2,4 GHz
Gewinn der Antenne	0 dB
Sende- und Empfangshöhe	1 m



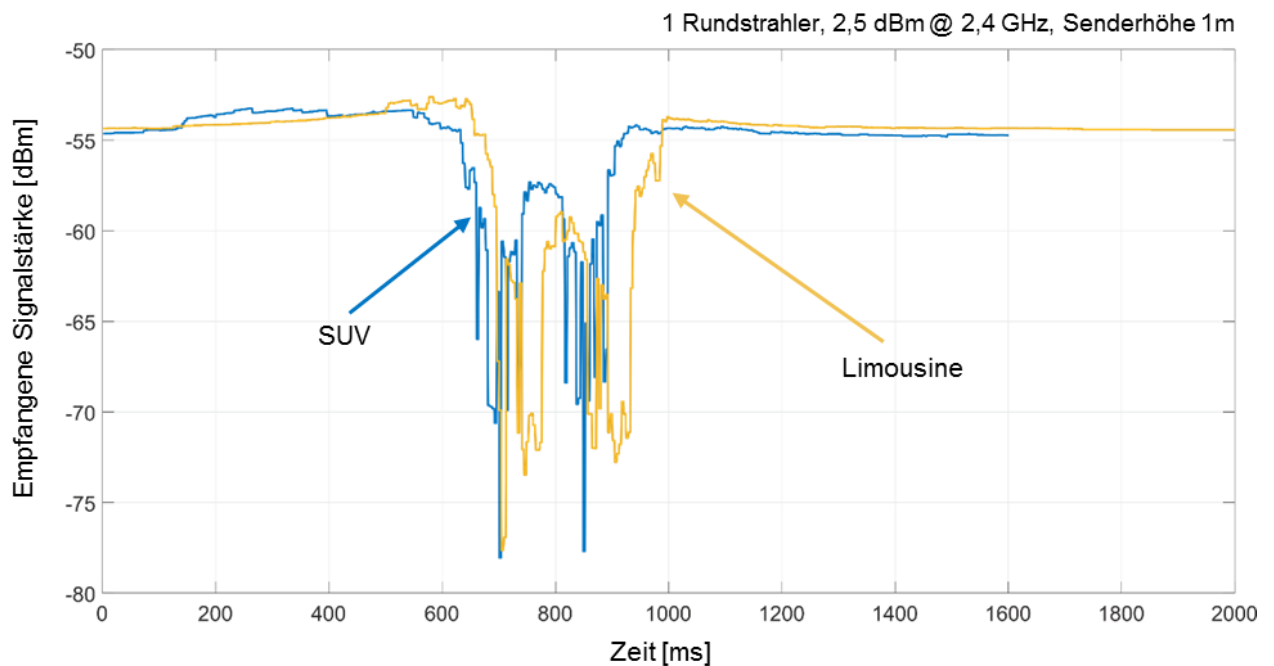
**Abbildung 58:** Aufbau des Beispielszenarios zur Strahlenverfolgung mit Berücksichtigung der Abschattung einer von Sender 2 ausgehenden Funkverbindung durch ein Fahrzeug.

Zunächst sollen die Auswirkungen der Durchfahrt von PKW und LKW durch das Messsystem für das gegebene Beispielszenario besprochen werden. Abbildung 59 zeigt die zeitliche Entwicklung der Empfangsleistung einer Funkverbindung bei der Durchfahrt einer Limousine und eines Sattelschleppers. Insbesondere bei Einbruchtiefe und –dauer der Signalstärke sind für beide Fahrzeugklassen deutliche Unterschiede zu erkennen, die im Wesentlichen auf die Bauform (Höhe, Länge, Anzahl der Achsen etc.) beider Fahrzeuge zurückzuführen sind.

Komplizierter als die Unterscheidung zweier Fahrzeugklassen mit klar unterschiedlichen Bauformen ist die typenspezifische Klassifikation von Fahrzeugen einer Fahrzeugklasse. Abbildung 60 zeigt die zeitliche Entwicklung der Signalstärke bei der Durchfahrt einer Limousine und eines SUV. In diesem Fall ergibt sich eine hohe Übereinstimmung beider Verläufe sowohl in Bezug auf die Anzahl als auch auf die Charakteristik der Signaleinbrüche.

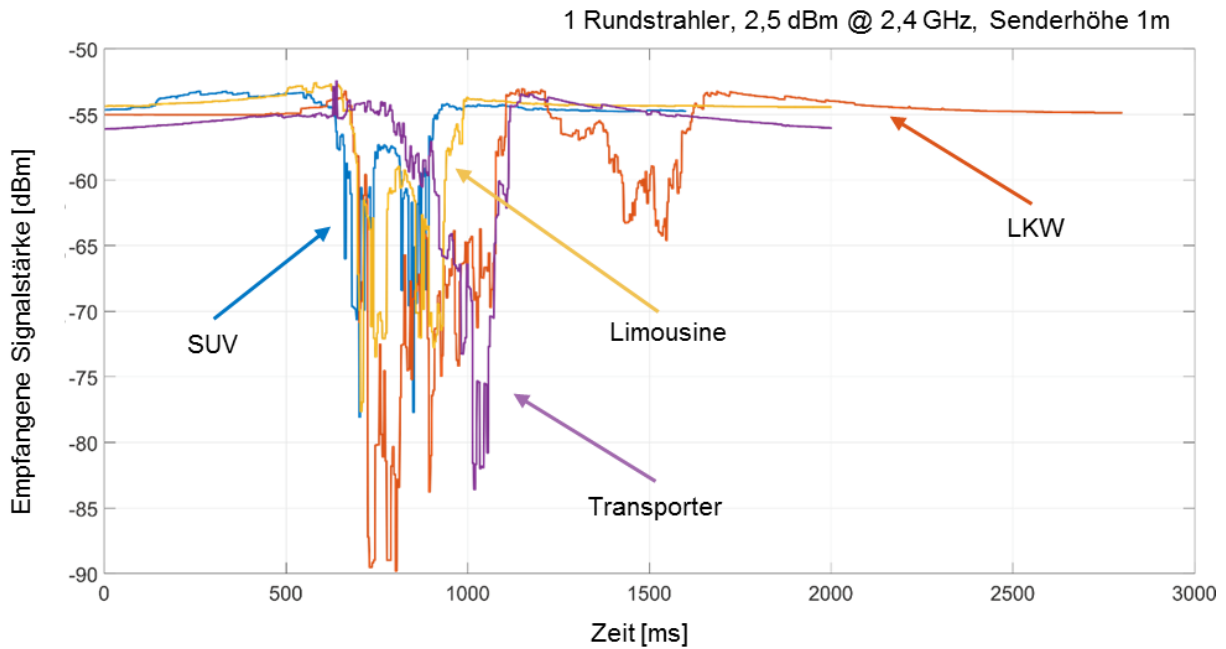


**Abbildung 59:** Zeitlicher Verlauf der Signalstärke einer Funkverbindung bei Durchfahrt einer Limousine und eines LKW



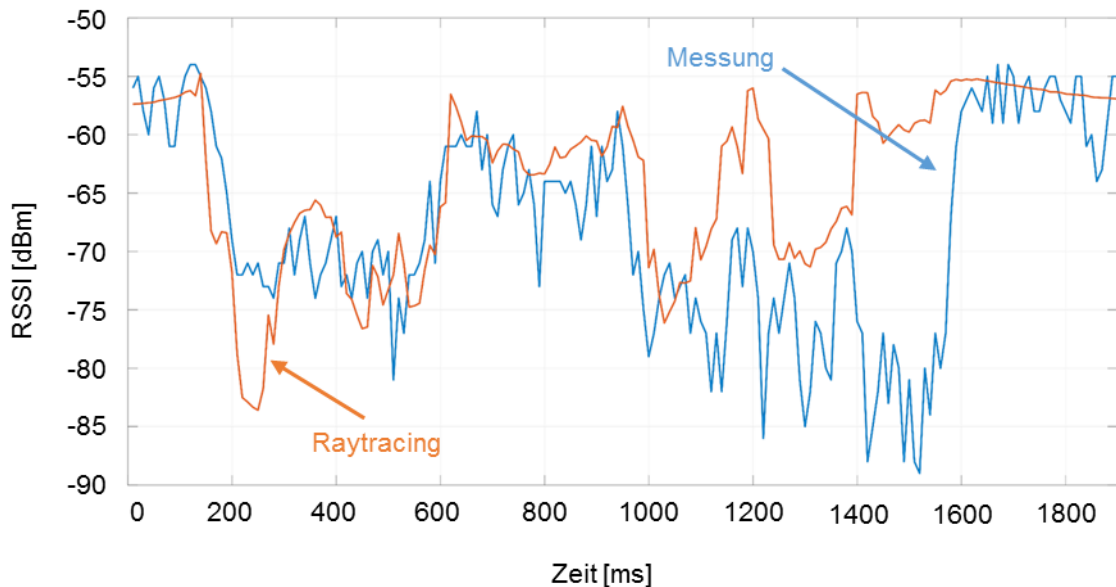
**Abbildung 60:** Zeitlicher Verlauf der Signalstärke einer Funkverbindung bei Durchfahrt unterschiedlicher PKW-Typen

Abschließend werden die Signalstärkeverläufe für die Durchfahrt diverser Fahrzeugtypen und –klassen für das gegebene Beispielszenario in Abbildung 61 einander gegenübergestellt.



**Abbildung 61:** Zeitlicher Verlauf der Signalstärke einer Funkverbindung bei Durchfahrt unterschiedlicher Fahrzeugtypen

Offensichtlich ergeben sich für verschiedene Fahrzeugklassen zum Teil signifikante Differenzen in Bezug auf die Abschattungscharakteristik (z.B. Einbruchtiefe und –dauer) des Funksignals. Während sich die Signalstärkeverläufe bei der Durchfahrt von LKW, Transporter und PKW deutlich unterscheiden, so ist eine Unterscheidung von verschiedenen PKW auf Basis der Signalverläufe sichtbar schwerer. Letzterer Umstand ist der Tatsache geschuldet, dass viele PKW ähnliche Merkmale in Hinblick auf die Fahrzeugkarosserie aufweisen.



**Abbildung 62:** Gegenüberstellung beispielhafter Signalstärkeverläufe bei Durchfahrt von LKW durch das Messsystem anhand von Raytracing- und Messdaten.

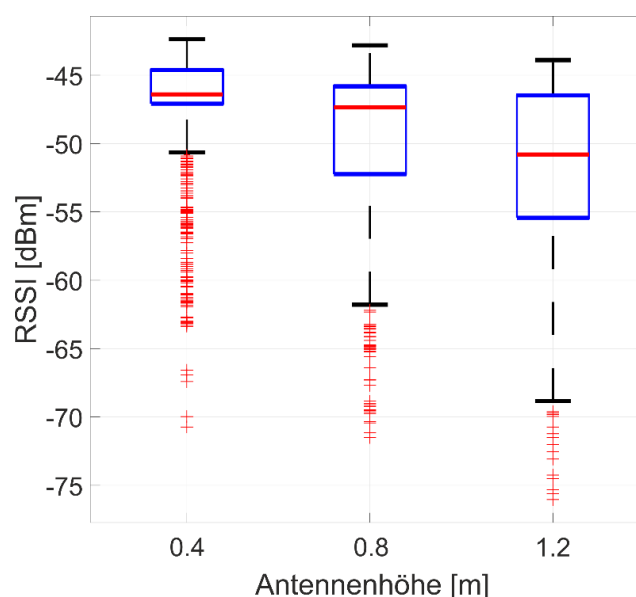
Abbildung 62 zeigt exemplarisch die zeitlichen Entwicklungen der Signalstärke bei Durchfahrt von Sattelkraftfahrzeugen (Sattelzugmaschine und Sattelaufleger) durch das Messsystem anhand von Raytracingergebnissen und Messdaten. Auf den ersten Blick weisen beide Verläufe bzgl. ihrer Charakteristik (Einbruchanzahl, -tiefe) eine große Ähnlichkeit auf. Bei genauer Betrachtung ergeben sich aber insbesondere bei den Signalstärkeeinbrüchen, vermutlich durch die Achsen von Sattelzugmaschine respektive Sattelaufleger hervorgerufen, Abweichungen von Raytracingergebnissen und Messdaten aufgrund unterschiedlicher Bauformen der Fahrzeuge bei den Feldmessungen und in der Simulation. Dennoch eignen sich die simulativ generierten Daten, wie die Ergebnisse der folgenden Anwendungsfälle zeigen, für die Untersuchung verschiedener Verkehrsszenarien und Systemparametrisierungen. Ferner wird die Raytracing-Simulation nicht mit dem Ziel einer exakten Rekonstruktion von Messergebnissen, sondern zwecks Abbildung der bei einer Fahrzeugdurchfahrt relevanten statistischen Charakteristika eingesetzt.

Neben der Berechnung von Abschattungseffekten bei der Durchfahrt verschiedener Fahrzeugtypen durch das Messsystem stellt die Optimierung der Kommunikationskomponenten entsprechend der Ausbreitungscharakteristiken einen weiteren Anwendungsfall der Strahlenverfolgungsberechnung dar. Beispielsweise erlaubt die Raytracing-Simulation eine einfache und aussagekräftige Evaluierung verschiedener Positionierungen, Ausrichtungen und Funkcharakteristiken (Rund-, Richtstrahler) von Send- und Empfangsantennen. Im Anschluss werden zwei Anwendungsfälle behandelt, bei denen die Verwendung der Raytracing-Simulation eine komfortable Analyse der Auswirkungen von verschiedenen Antennenhöhen bzw. von unterschiedlichen Abständen zwischen Fahrzeug und Leitpfosten erlaubt. Abschließend wird die hohe Eignung der statistischen Eigenschaften der Simulationsdaten in Bezug auf die Fahrzeugklassifikation anhand der mit den Verfahren kNN, SVM und NN erzielten Klassifikationsergebnisse gezeigt.

### Auswirkung der Antennenhöhe auf die Empfangsleistung

Die Evaluierung geeigneter Systemparameter ist wichtig, damit für den anschließenden Klassifikationsprozess aussagekräftige Messdaten für ein breites Spektrum an Fahrzeugtypen zur Verfügung gestellt werden können.

Abbildung 63 verdeutlicht den Einfluss der Installationshöhe (Abstand zum Boden) einer Sendeantenne mit Richtcharakteristik auf die beim Empfänger vorherrschende Signalstärke. So führt eine Antennenhöhe von 40 cm zu geringeren Abschattungseffekten im Vergleich zu einer Antennenhöhe von 1,2m.



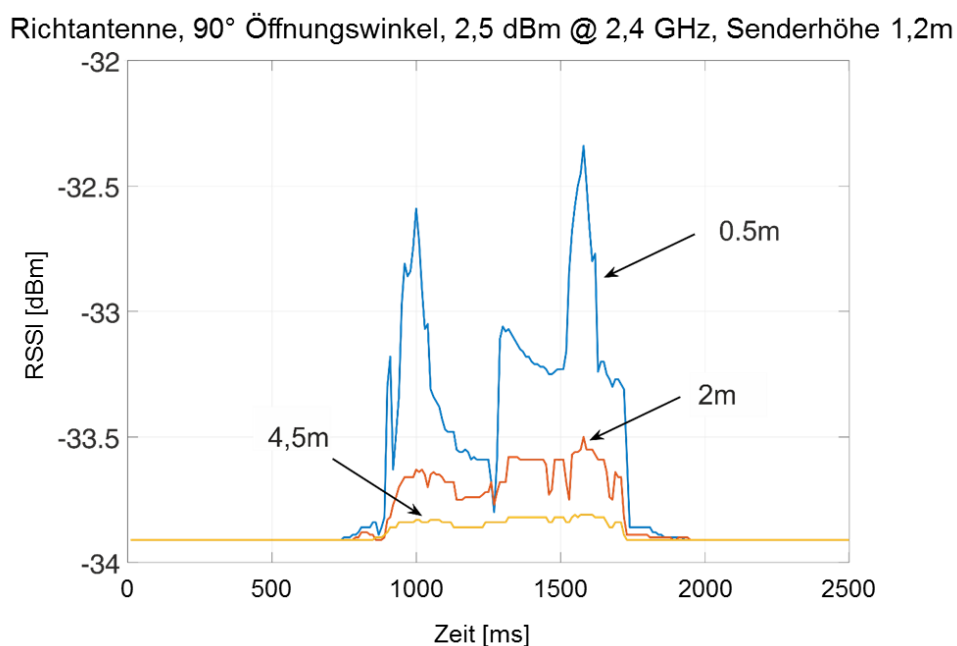
**Abbildung 63:** Beim Empfänger vorherrschende Feldstärken bei Abschattung durch verschiedene Fahrzeugtypen und für unterschiedliche Antennenhöhen.



Dieser Effekt lässt sich damit erklären, dass bei einer geringen Installationshöhe der Antenne nur ein kleiner Anteil der insgesamt emittierten Feldstärke während der Durchfahrt des Fahrzeuges gedämpft bzw. reflektiert wird. Der Großteil der elektromagnetischen Wellen kann sich weiterhin ungehindert zwischen Fahrzeugumpf und Straßenoberfläche ausbreiten. Mit zunehmender Antennenhöhe verstärkt sich auch dieser Abschattungseffekt. Bei einer Installationshöhe von 1,2 m befinden sich die Antennen und die Chassis vieler Fahrzeuge auf einer Höhe, sodass der Abschattungseffekt in diesem Fall stark ausgeprägt ist und somit das Groß der Signalleistung gedämpft bzw. reflektiert wird.

### Auswirkung des Abstandes zwischen Fahrzeug und Leitpfosten auf die reflektierte Signalstärke

Einen weiteren Anwendungsfall für Raytracing-Simulationen stellt die Untersuchung des Zusammenhangs zwischen dem Abstand eines durch das Messsystem fahrenden Fahrzeuges und den Sendeeinheiten sowie der sich hierbei ergebenden reflektierten Signalleistung dar. Abbildung 64 zeigt anhand eines Beispiels die zeitliche Entwicklung der reflektierten Signalleistung bei Durchfahrt eines Fahrzeuges mit verschiedenen Abständen zur Sendeeinheit.



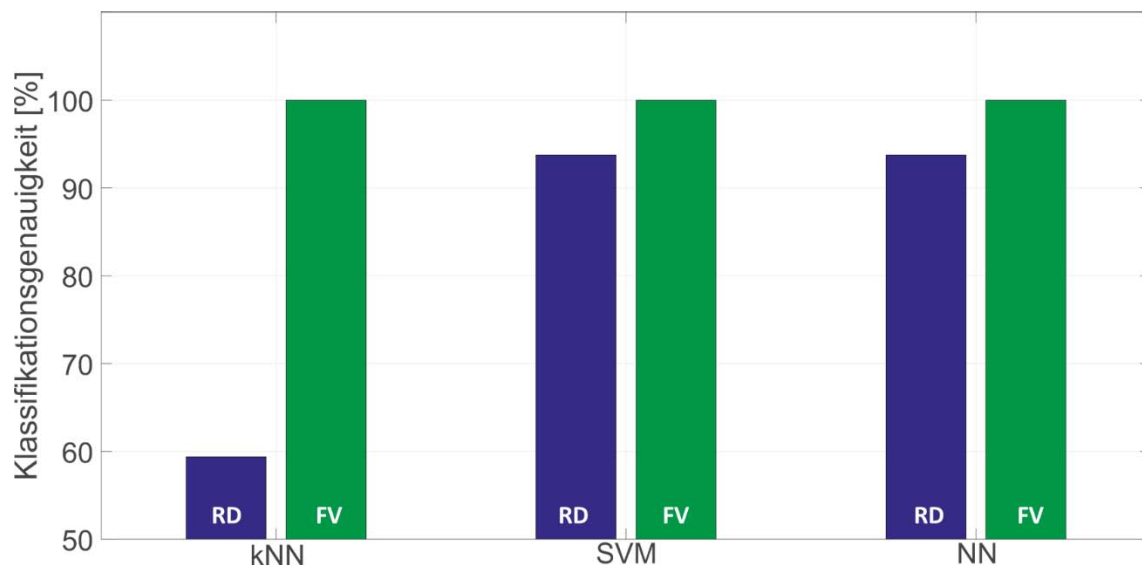
**Abbildung 64:** Beispielhafte Signalstärkeverläufe eines reflektierten Signals bei Durchfahrt eines Fahrzeuges mit unterschiedlichen Abständen zu einer Sendeeinheit des Messsystems

Je geringer der Abstand eines passierenden Fahrzeuges zu den Sendeeinheiten des Messsystems ausfällt, desto größer ist die am emittierenden Leitpfosten vorherrschende Signalstärke des vom Fahrzeug reflektierten Signals. Ergo ergeben sich für einen relativ kleinen Abstand von einem halben Meter zwischen Sendeeinheit und Fahrzeug die größten positiven Signalstärkeauschläge von bis zu -32,5 dBm. Mit wachsendem Abstand lässt dieser Effekt zunehmend nach, sodass die maximale Signalstärke des reflektierten Signals nur noch -33,5 dBm (bei einem Abstand von 2 Metern) beträgt bzw. im Fall des größten untersuchten Abstandes von 4,5 Metern kaum noch als Ausschlag wahrgenommen wird. Dieser simulativ nachgewiesene Zusammenhang zwischen Abstand und reflektierter Signalstärke lässt sich insbesondere im Hinblick auf die Fahrzeugdetektion bei mehrspurigen Straßen

ausnutzen, da auf diese Weise eine fahrspurselective Detektion und Klassifikation von Fahrzeugen ermöglicht wird.

### Eignung der Simulationsdaten für die Fahrzeugklassifikation

Abschließend soll die hohe Eignung der Simulationsdaten für die Fahrzeugklassifikation, trotz der im Vorfeld gezeigten Differenzen zwischen Simulations- und Messdaten, demonstriert werden. Abbildung 65 zeigt die Klassifikationsergebnisse bei Anwendung der Verfahren kNN, SVM und NN bei Eingabe von simulativ generierten Rohdaten (RD) bzw. daraus abgeleiteten Feature Vektoren (FV) als Testdaten. Auffällig ist, dass die Nutzung von Rohdaten vor allem bei Gebrauch der kNN zu einer geringen Klassifikationsgenauigkeit von knapp 60% führt, wohingegen die Verfahren SVM und NN Klassifikationsergebnisse von mehr als 90% vorzuweisen haben. An dieser Stelle macht sich die eingangs erwähnte Abweichung der simulativ erzeugten bzw. real gemessenen RSSI-Zeitverläufe besonders bemerkbar, da die kNN nach einem Objekt mit der größten Ähnlichkeit in Bezug auf die gegebenen Merkmale sucht und hierfür einen punkweisen Vergleich der RSSI-Zeitreihen durchführt. Ein grundsätzlich anderes Bild ergibt sich, wenn den genannten Entscheidungsalgorithmen aus den Simulationsdaten abgeleitete Feature Vektoren zugeführt werden. In diesem Fall erreichen alle Verfahren ein Klassifikationsergebnis von 100%. Diese hohen Klassifikationsquoten belegen die allgemein hohe Eignung der statistischen Eigenschaften der Simulationsdaten für die Fahrzeugklassifikation. Zwar führt die Verwendung simulativ generierter RSSI-Zeitreihen vor allem bei Nutzung der kNN zu einer geringen Klassifikationsgenauigkeit, auf die übrigen Verfahren haben die Abweichung von Simulations- und Messdaten aber keinen gravierend nachteiligen Einfluss. Diese Annahme wird bei Betrachtung der Klassifikationsergebnisse unter Verwendung der von den simulativ generierten RSSI-Zeitreihen abgeleiteten Feature Vektoren, die eine kompakte Darstellung verschiedener statistischer Größen des RSSI-Verlaufes darstellen, bestätigt. Nun führt auch die Nutzung der kNN zu einer Klassifikationsgenauigkeit von 100%, da wesentliche statistische Kenngrößen dank Feature Extraktion bereits vorgegeben werden.



**Abbildung 65:** Klassifikationsergebnisse bei Verwendung von simulativ generierten Rohdaten (RD) und daraus abgeleiteten Feature Vektoren (FV) für mit Messdaten antrainierte Entscheidungsalgorithmen kNN, SVM und NN.

## 4.3 ÜBERFÜHRUNG DER KLASSIFIKATIONSALGORITHMIK AUF EINGEBETTETE SYSTEME (AP5, AP6)

Im nächsten Schritt werden die im Vorfeld vorgestellten und für verschiedene Eingabedatentypen evaluierten Klassifikationsverfahren auf eingebettete Systeme portiert. Im Gegensatz zu herkömmlichen Personal Computern werden eingebettete Systeme primär für spezielle Aufgabenbereiche entwickelt respektive optimiert, sodass häufig eine höhere Leistungsfähigkeit und Betriebssicherheit als bei generischen Systemen bei gleichzeitiger Kostenreduktion erzielt werden kann. Weitere allgemeine Anforderungen an eingebettete Systeme sind unter anderem geringe Anschaffungs- und Betriebskosten sowie ein niedriger Energie- und Platzbedarf.

### 4.3.1 EVALUIERUNG DER HARDWAREANFORDERUNGEN

Ein wesentlicher Punkt in Bezug auf die Portierung der Klassifikationsalgorithmik auf eingebettete Systeme ist die maßgerechte Dimensionierung der benötigten Hardware. Konkret müssen die Hardwarekomponenten so dimensioniert sein, dass die zur Fahrzeugklassifikation notwendigen vorbereiteten Daten jederzeit sowohl im Festwert- als auch im Arbeitsspeicher vorgehalten werden können, um den komplexen Klassifikationsprozess innerhalb einer vorgegebenen Zeitspanne durchführen zu können. Andererseits läuft eine zu großzügig bemessene Hardwaredimensionierung den eingangs genannten Anforderungen zuwider. Folglich ist eine tiefgreifende Analyse der benötigten Hardwareanforderungen für eine effiziente und energiesparende Klassifikation unabdingbar. Diesbezüglich müssen Aspekte wie Speicherbedarf (Abschnitt 4.3.2), Laufzeitanforderungen (Abschnitt 4.3.3) und Leistungsaufnahme (Abschnitt 4.4.2) ermittelt werden. Die folgenden Abschnitte zeigen die Untersuchungsergebnisse für diese Aspekte ausführlich auf und erlauben eine passgenaue und anforderungsgerechte Dimensionierung der Hardware.

### 4.3.2 DEFINITION UND SPEICHERBEDARFSANALYSE EINER GEEIGNETEN SENSORDATENSTRUKTUR

Die Auflösung der vom Messsystem aufgezeichneten und für die Fahrzeugklassifikation bereitgestellten Messdaten reicht weit über das für eine hohe Klassifikationsgenauigkeit von über 99 Prozent benötigte Maß hinaus.

Folglich führt die Nutzung derart hoch aufgelöster Messwerte zu keinem zusätzlichen Gewinn in Bezug auf die Klassifikationsgenauigkeit, dafür aber zu einem signifikant erhöhten Speicher- und Rechenaufwand, der ein unnötig groß dimensioniertes Embedded System für die Klassifikation erfordert. In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse einer Speicherbedarfsanalyse für unterschiedliche Sensordatenstrukturen und deren Auswirkung auf die Klassifikationsgenauigkeit vorgestellt.

**Tabelle 15:** Übersicht unterschiedlicher Datentypen für die Repräsentation eines Trainingsdatensatzes bestehend aus 2736 Fahrzeugen mit Rohdaten (800 Werte) bzw. Feature Vektoren (6 Features)

Datentyp	Unterstützter Wertebereich	Speicherbedarf Rohdaten [Byte]	Speicherbedarf Feature Vektoren [Byte]	Einsparungsfaktor bei Nutzung von Feature Vektoren
Vorzeichenlose Ganzzahlen (uint8)	0 – 255 (Ganzzahlen)	2261223 [2,16 MByte]	19152 [0,018 MByte]	118
Vorzeichenbehaftete Fließkommazahlen (float16)	1 Vorzeichenbit, 10 Bit Mantisse, 5 Bit Exponent	4522446 [4,31 MByte]	38304 [0,037 MByte]	118
Vorzeichenbehaftete Fließkommazahlen (float64)	1 Vorzeichenbit, 52 Bit Mantisse, 11 Bit Exponent	18089784 [17,25 MByte]	153216 [0,146 MByte]	118

Da bei Einsatz der kNN ein Datensatz zum Abgleich von Eingabedaten auf dem Embedded System vorliegen muss, ist eine Abschätzung der erforderlichen Speicherkapazität bei Verwendung von Rohdaten bzw. Feature Vektoren unerlässlich. Wie den Ergebnissen der Speicherbedarfsanalyse in Tabelle 15 zu entnehmen ist, folgt aus der Verwendung von Feature Vektoren anstelle von Rohdaten ein um den Faktor 118 geringerer Speicherplatzbedarf. Dieses Verhältnis der Speicherplatzreduktion gilt für die Nutzung vorzeichenloser Ganzzahlen sowie bei Anwendung vorzeichenbehafteter Fließkommazahlen mit 16 Bit- und 64-Bit-Auflösung. Darüber hinaus lässt sich der Speicherplatzbedarf auch durch die Wahl des Datentyps drastisch reduzieren. Im Fall der Float 64-Zahlrepräsentation wird mit 17,25 Megabyte (MB) für die Rohdaten bzw. 0,15 MB für die Feature Vektoren mit Abstand am meisten Speichervolumen belegt. Hieran schließt sich die Nutzung einer 16-bittigen-Fließkommazahlenrepräsentation mit 4,31 MB bzw. 0,037 MB für die Darstellung der Rohdaten respektive der Feature Vektoren an.

**Tabelle 16:** Klassifikationsgenauigkeit für verschieden aufgelöste Inputdaten

Input	Zahlenrepräsentation	Auflösung	Klassifikationsgenauigkeit [%]
Feature Vektoren	Ganzzahl	max. 2-stellig [Wertebereich 0-10]	98,85
		max. 3-stellig [Wertebereich 0-100]	98,84
	Fließkommazahl	1 Nachkommastelle	98,59
		2 Nachkommastellen	98,93
		3 Nachkommastellen	98,94
Rohdaten	Ganzzahl	max. 2-stellig [Wertebereich 0-10]	98,33
		max. 3-stellig [Wertebereich 0-100]	98,10
	Fließkommazahl	1 Nachkommastelle	98,53
		2 Nachkommastellen	98,44
		3 Nachkommastellen	98,45

Das größte Einsparpotenzial im Hinblick auf die Speicherauslastung folgt aus der Anwendung einer vorzeichenlosen Ganzzahlenarithmetik mit 8-Bit-Auflösung, das sich für den notwendigen Trainingsdatensatz auf den Faktor 8 bzw. Faktor 2 beläuft. Neben dem enormen Einsparpotenzial geht mit der geringeren Wertauflösung aber auch ein Informationsverlust einher. Welche Konsequenzen die Wahl

unterschiedlich aufgelöster Zahlrepräsentationen für die Klassifikationsgenauigkeit bei Anwendung eines Neuronalen Netzes hat, zeigen die Klassifikationsergebnisse in Tabelle 16. Unabhängig von Art und Auflösung der Inputdaten (Rohdaten, Feature Vektor), ergeben sich vergleichbare Klassifikationsergebnisse im Bereich von etwa 98%. Die hierbei auftretenden geringfügigen Abweichungen der Klassifikationsergebnisse sind insbesondere auf die randomisierte Aufteilung des Datensatzes in Trainings- und Testdaten zurückzuführen.

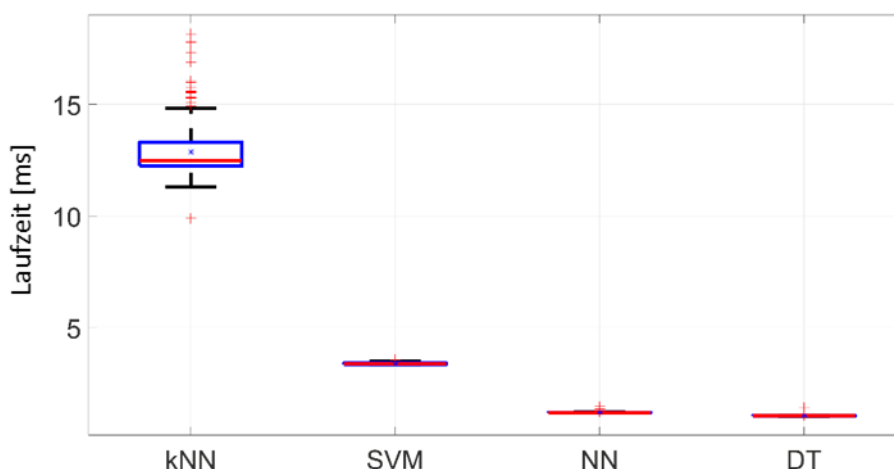
#### 4.3.3 LAUFZEITENANALYSE DER KLASSIFIKATIONSVERFAHREN AUF EINGEBETTETEN SYSTEMEN

Abgesehen von der Dimensionierung des Speichers stellt auch die Rechenleistung des eingebetteten Systems eine entscheidende Rolle für die Klassifikationsprozedur dar. Während das rechenintensive Anlernen (Training) der Klassifikationsalgorithmen einmalig offline auf einem PC erfolgen kann, wird die eigentliche Fahrzeugklassifikation mit jeder Durchfahrt eines Fahrzeugs durch das Messsystem auf dem Embedded System durchgeführt.

**Tabelle 17:** Laufzeiten für verschiedene Entscheidungsalgorithmen auf unterschiedlichen Embedded Systems und einem Desktop PC bei Nutzung von Rohdaten (RD) und Feature Vektoren (FV) in Sekunden

Verfahren	Banana Pi Gen .1		BeagleBone Black		Desktop PC		Raspberry Pi Gen. 1		Raspberry Pi Gen. 3	
	RD	FV	RD	FV	RD	FV	RD	FV	RD	FV
kNN	0,027	0,009	0,051	0,009	0,002	0,001	0,079	0,022	0,013	0,003
SVM	0,008	0,003	0,016	0,002	0,0005	0,0001	0,026	0,006	0,003	0,001
NN	0,004	0,004	0,004	0,004	0,0004	0,0003	0,010	0,010	0,001	0,001
DT	0,004	0,004	0,003	0,003	0,0004	0,0004	0,009	0,009	0,001	0,001

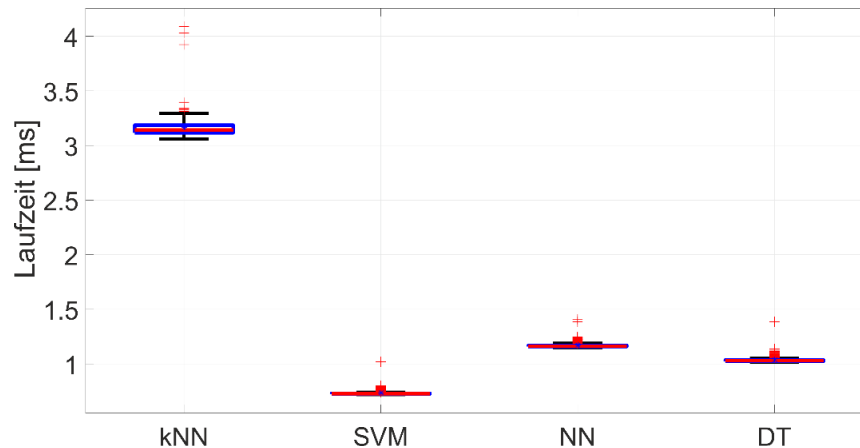
Im Vergleich zum Anlernen der Entscheidungsalgorithmen erfolgt die Ausführung der Klassifikation in bedeutend kürzerer Zeit. Tabelle 17 und Abbildung 66 sowie Abbildung 67 zeigen Ergebnisse und statistische Auswertungen der Klassifikationslaufzeiten bei Nutzung verschiedener Klassifikationsalgorithmen.



**Abbildung 66:** Laufzeiten für verschiedene Klassifikationsalgorithmen bei Nutzung von Rohdaten (Embedded System: RPi 3)

In Abbildung 66 sind die Laufzeiten für die Klassifikationsverfahren k-Nearest-Neighbor, Support Vector Machine, Neuronales Netz und Decision Tree, bei ausschließlicher Verwendung von reinen Messdaten, einander gegenübergestellt. Offensichtlich hat der Gebrauch von rohen Messdaten, insbeson-

dere bei Anwendung des kNN-Algorithmus, deutlich längere Laufzeiten zur Folge. Verglichen mit den übrigen Verfahren fällt deren mittlere Laufzeit mindestens um den Faktor 4 (SVM) bzw. Faktor 13 (NN und DT) größer aus. Dieser signifikante Laufzeitunterschied kann mit der Funktionsweise des kNN-Verfahrens begründet werden, bei dem für jeden Datenpunkt aus dem zu klassifizierenden Eingangssignal der euklidische Abstand zu allen anderen korrespondierenden Datenpunkten aus dem Trainingsdatensatz berechnet wird. Da der kNN-Algorithmus im Gegensatz zu den anderen Entscheidungsalgorithmen im Zuge des Anlernens keine Aggregation der Trainingsdaten durchführt, ist insbesondere jeder Klassifikationsdurchlauf mit einem erhöhten Rechenaufwand verbunden.



**Abbildung 67:** Laufzeiten für verschiedene Klassifikationsalgorithmen bei Nutzung von Feature Vektoren (Embedded System: RPi 3)

Eine Verbesserung der Laufzeiten kann vor allem für die Verfahren kNN und SVM bei Verwendung von Feature Vektoren anstelle von Rohdaten erreicht werden. So beläuft sich die zeitliche Verkürzung der Laufzeiten für den kNN-Algorithmus auf den Faktor 4,33, wohingegen dieser im Falle der SVM den Wert 3 annimmt (siehe Abbildung 67, Tabelle 18). Lediglich bei den übrigen Verfahren (NN und DT) ergibt sich durch diesen Wechsel der Eingabedaten keine Veränderung hinsichtlich der Klassifikationslaufzeiten.

Im Allgemeinen liegen die Laufzeiten für die untersuchten Klassifikationsverfahren bei Eingabe von Rohdaten und Feature Vektoren allesamt im Millisekundenbereich, womit die zeitlichen Anforderungen im Rahmen der Parkplatzbilanzierung eingehalten werden.

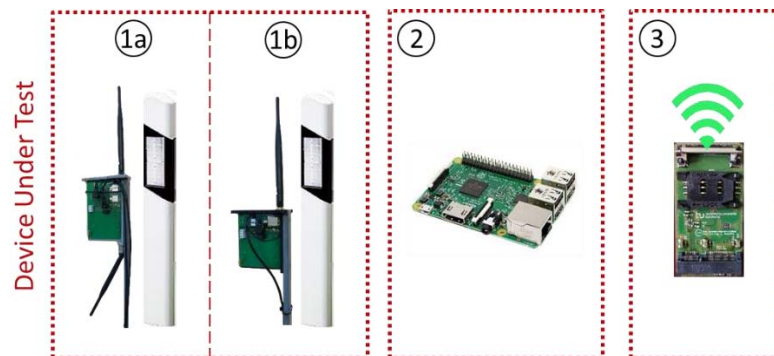
**Tabelle 18:** Vergleich der Laufzeiten für verschiedene Klassifikationsverfahren bei Nutzung von Rohdaten und Feature Vektoren (Embedded System: RPi3)

Klassifikationsverfahren	Rohdaten: Laufzeit [s]	Feature Vektoren: Laufzeit [s]	Faktor für Laufzeit -differenz
k-Nearest-Neighbor	0,013	0,003	4,33
Support Vector Machine	0,003	0,001	3
Neuronales Netz	0,001	0,001	1
Decision Tree	0,001	0,001	1



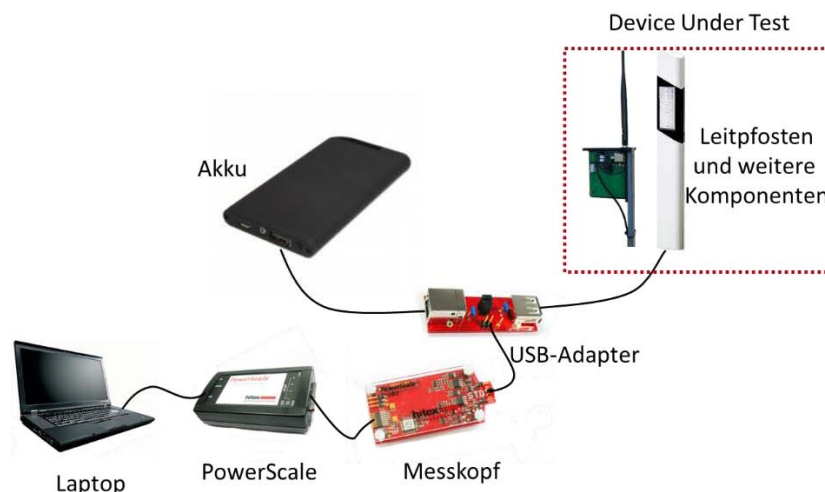
#### 4.4 ENERGIEBILANZIERUNG DES KLASSIFIKATIONSSYSTEMS (AP7)

Eine essenzielle Voraussetzung für einen langfristigen und energieautarken Betrieb des Klassifikationssystems stellt seine Leistungsaufnahme bzw. sein Energiebedarf dar. Einerseits müssen bei den Klassifikationen vorgegebene Echtzeitschranken eingehalten werden, andererseits dürfen kürzere Laufzeiten auch keine hohe Leistungsaufnahme zur Folge haben. Ergo liegt das Ziel bei der Evaluierung eines geeigneten eingebetteten Systems darin, einen Kompromiss aus Laufzeit und Leistungsaufnahme für die Fahrzeugklassifikation zu finden.



**Abbildung 68:** Klassifikationssystem bestehend aus Funksensorik (Empfangseinheit: 1a, Sendeeinheit: 1b), Embedded System mit Klassifikationslogik (2) und Breitbandschnittstelle (3)

Einer dieser Aspekte, die Laufzeitanalyse für die Fahrzeugklassifikation auf eingebetteten Systemen, wurde bereits in Abschnitt 4.3.3 behandelt. Dieses Kapitel widmet sich der noch offenen Frage nach der Energiebilanzierung des Klassifikationssystems bestehend aus Funksensorik des Messsystems, Embedded System mit Klassifikationslogik und Breitbandschnittstelle (siehe Abbildung 68).



**Abbildung 69:** Messaufbau zur Messung der Leistungsaufnahme verschiedener Systemkomponenten (DUT, Device Under Test)

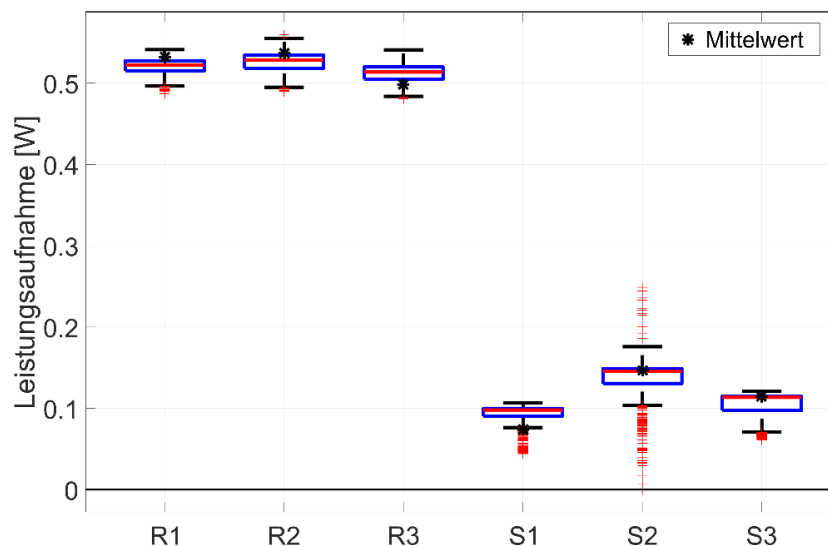
Für eine komponentenweise Analyse der Leistungsaufnahme wurde der in Abbildung 69 gezeigte Messaufbau bestehend aus Messobjekt (Device Under Test, DUT) und Messinstrumenten verwendet. Im konkreten Fall bezieht das DUT die benötigte elektrische Leistung von einem Akkumulator, wobei der in Reihe geschaltete USB-Adapter als Messpunkt für den eigentlichen Messkopf fungiert. Dieser

wiederum ist an der Basiseinheit angeschlossen und ermöglicht eine hochfrequente Aufzeichnung wesentlicher elektrischer Leistungsparameter, die mit Hilfe eines Computers grafisch dargestellt oder zwecks nachfolgender Verarbeitung abgespeichert werden können.

#### 4.4.1 ENERGIEBILANZIERUNG DER FUNKSENSORIK DES MESSSYSTEMS

Das Messsystem besteht aus drei Empfangs- (siehe Abbildung 68 (1a)) und drei Sendeeinheiten (siehe Abbildung 68 (1b)). Dabei sind die Empfangseinheiten mit einem zweiten Microcontroller für die interne Kommunikation mit dem Masterknoten ausgestattet. In Abbildung 70 ist die gemessene Leistungsaufnahme der drei Sende- bzw. Empfangseinheiten dargestellt. Während die aufgenommene Leistung bei den Empfangseinheiten (R1, R2, R3) im Mittel bei etwa 0,5 W liegt, fällt diese für die Sendeeinheiten (S1, S2, S3) mit etwa 0,1 W erheblich niedriger aus.

Die höhere Leistungsaufnahme der Empfangseinheiten ist auf den zweiten Mikrocontroller, der für die Aggregation und den internen Austausch der gemessenen Signalstärkeinformationen verwendet wird, zurückzuführen. Insgesamt ergibt sich für das Messsystem, bestehend aus drei Sende- und drei Empfangseinheiten, eine Leistungsaufnahme von 1,8 W.



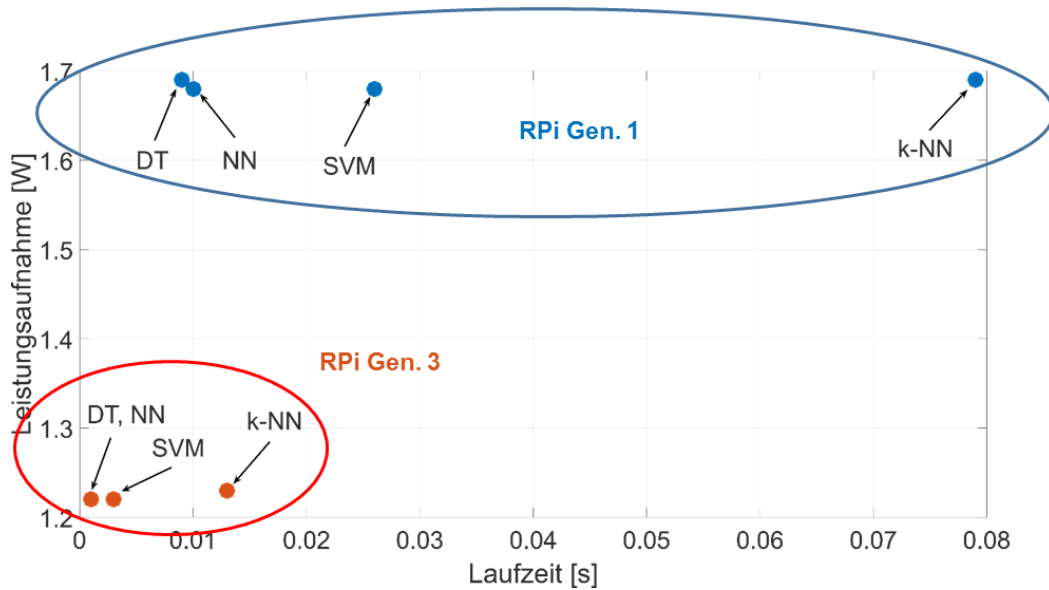
**Abbildung 70:** Leistungsaufnahme von Empfangs- (R1,R2,R3) und Sendeeinheiten (S1,S2,S3) des Messsystems

#### 4.4.2 ENERGIEBILANZIERUNG FÜR VERSCHIEDENE EINGEBETTETE SYSTEME UND KLASSIFIKATIONSVERFAHREN

Im Sinne einer Fokussierung der Ergebnisse wurde die folgende Untersuchung auf zwei eingebettete Systeme (Raspberry Pi Generation 1 (RPi 1) und Raspberry Pi Generation 3 (RPi 3)) begrenzt. Abbildung 71 stellt die Laufzeiten für die Klassifikationsverfahren Decision Tree, k-Nearest-Neighbor, Neuronale Netze und Support Vector Machine bei der Nutzung von Rohdaten gegenüber.

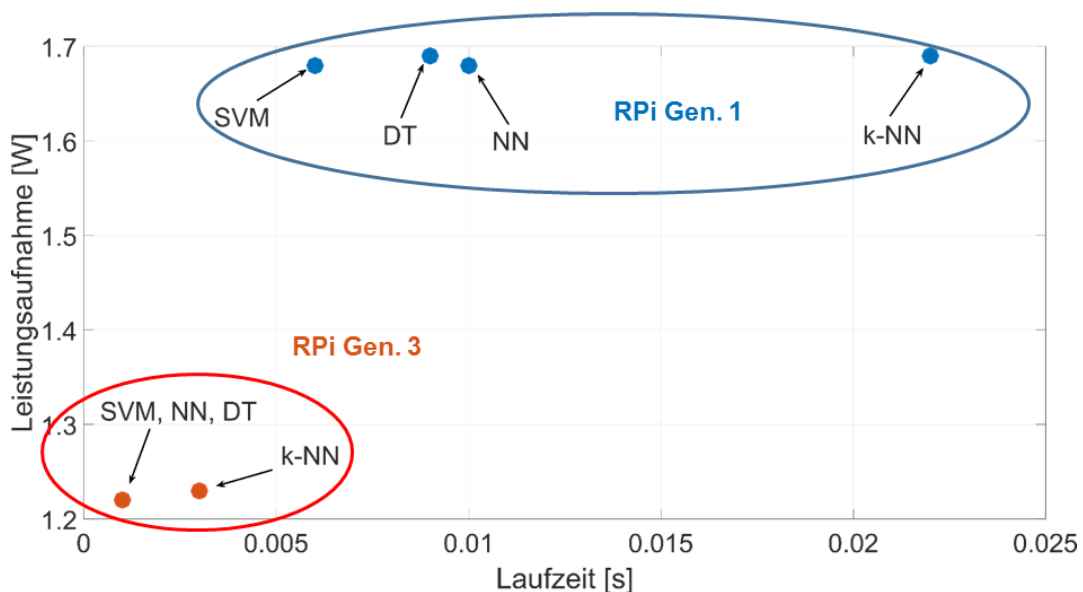
Deutlich zu erkennen ist eine größere Streuung der Laufzeiten für die untersuchten Verfahren, sofern der RPi 1 Verwendung findet. Im Vergleich dazu erreichen die Klassifikationslaufzeiten für jene Verfahren bei Nutzung des RPi 3 ähnliche Werte.

Als weitere Konsequenz ergibt sich aus dem Einsatz des RPi 1 eine im Mittel deutlich höhere Leistungsaufnahme (ca. 1,7 W) verglichen mit der mittleren Leistungsaufnahme im Falle des RPi 3 (1,2W).



**Abbildung 71:** Klassifikationslaufzeit vs. Leistungsaufnahme bei Nutzung von Rohdaten für RPi 1 und RPi 3

Ein analoges Bild ergibt sich bei der Nutzung von Feature Vektoren anstelle der Rohdaten für die Fahrzeugklassifikation (s. Abbildung 72). Nach wie vor führt die Verwendung des RPi 1 zu einer vergleichsweise großen Streuung der Laufzeiten für die untersuchten Klassifikationsverfahren und zu einer durchschnittlichen Leistungsaufnahme von etwa 1,7 W. Auch mit Blick auf die mittlere Leistungsaufnahme ergibt sich bei Gebrauch des RPi 3 keine signifikante Änderung (ca. 1,2 W). Allerdings liegen nun die Laufzeiten für DT, kNN und SVM in etwa gleichauf.

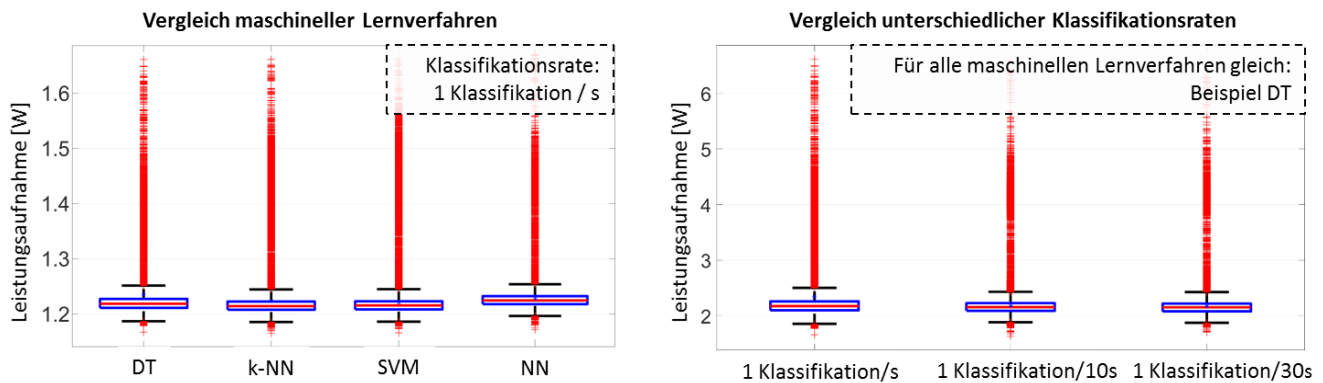


**Abbildung 72:** Klassifikationslaufzeit vs. Leistungsaufnahme bei Verwendung von Feature Vektoren für RPi 1 und RPi 3

Aufgrund dieser Ergebnisse liegt der Fokus der nachfolgenden Untersuchungen bzgl. der Energiebilanzierung verschiedener Klassifikationsverfahren ausschließlich auf dem RPi3.

In Abbildung 73 sind die Messwerte zur Leistungsaufnahme des Embedded Systems sowohl bei Anwendung verschiedener Klassifikationsverfahren mit einer konstanten Klassifikationsrate von einer Klassifikation pro Sekunden als auch für unterschiedliche Klassifikationsraten bei ausschließlicher Nutzung des DT-Algorithmus dargestellt.

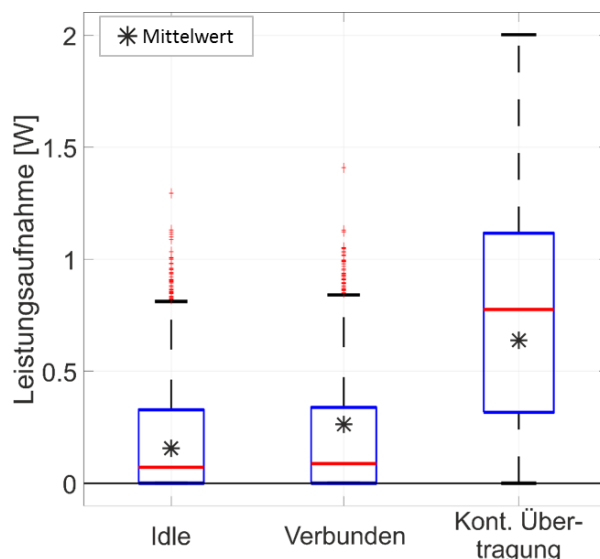
Offensichtlich hat die Wahl des Klassifikationsverfahrens bei einer Klassifikationsrate von einer Klassifikation pro Sekunde keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf die Leistungsaufnahme (ca. 1,2 W) des Embedded Systems zur Folge. Eine ähnliche Beobachtung kann auch für divergierende Klassifikationsraten bei Nutzung des DT-Algorithmus (s. Abbildung 73, rechts) und der übrigen Verfahren gemacht werden. Allerdings impliziert an dieser Stelle eine Klassifikationsrate von 1 Klassifikation/s bereits die höchste Systemlast. Aber auch bei geringeren Klassifikationsraten ergeben sich keine nennenswerten Differenzen im Hinblick auf die mittlere Leistungsaufnahme, sodass der RPi3 für den besagten Anwendungszweck als überdimensioniertes Embedded System angenommen werden kann.



**Abbildung 73:** Vergleich der Leistungsaufnahme des Embedded System bei Anwendung verschiedener Klassifikationsverfahren und konstanter Klassifikationsrate (links) und unterschiedlichen Klassifikationsraten bei Nutzung des Decision-Tree-Algorithmus (rechts)

#### 4.4.3 ENERGIEBILANZIERUNG DER BREITBANDSCHNITTSTELLE

Die mit den Detektions- und Mustererkennungsverfahren erzielten Ergebnisse der Fahrzeugklassifikation sollen nicht nur lokal vorgehalten und genutzt, sondern auch für weitere Analysen über einen Cloud-Dienst bereitgestellt werden. Als Kommunikationsmedium für Austausch und Abgleich der Informationen zwischen lokalem Klassifikationssystem und Cloud-Dienst bietet sich die Anbindung über das Mobilfunknetz an. Der Vorteil bei der Nutzung existenter Kommunikationsinfrastrukturen wie den Mobilfunknetzen, die neben einer flächendeckenden Verfügbarkeit auch Datenübertragungen mit hohen Datenraten und geringen Latenzen bieten, liegt insbesondere in den geringen Installations- und Instandhaltungskosten. Im Rahmen dieses Projektes wurde ein LTE-Modem der Firma Huawei (Modell ME909u) hinsichtlich einer Energiebilanzierung untersucht. In einer Messreihe wurde die Leistungsaufnahme des LTE-Modems für die drei Zustände „Idle“, „Verbunden“ und „kontinuierliche Datenübertragung“ evaluiert. Hierbei impliziert der Zustand „Idle“, dass das LTE-Modem zwar eingeschaltet und mit dem Hostsystem verbunden ist, es sich aber nicht in ein Mobilfunknetz eingewählt hat. Nichtsdestotrotz wertet das LTE-Modem kontinuierlich essenzielle Systemparameter auffindbarer Mobilfunknetze aus, was die in Abbildung 74 (links) aufgezeigten Schwankungen seitens der Leistungsaufnahme erklärt. Der Zustand „Verbunden“ bringt zum Ausdruck, dass das LTE-Modem nun in ein Mobilfunknetz eingewählt und bereit für die Übertragung von Nutzinformationen wie Klassifikationsergebnissen ist. Nach wie vor wertet das Modem systemrelevante Informationen (u.a. die Signalstärke) aus, tauscht im heimischen Mobilfunknetz aber zusätzlich weitere Daten (u.a. Steuerdaten) mit dem Kernnetz aus. Die kontinuierliche Datenübertragung (Abbildung 74, rechts) stellt einen vereinfachten Anwendungsfall dar, bei dem die Leistungsaufnahme des LTE-Modems bei einer periodischen Übermittlung von Klassifikationsergebnissen in 30-sekündigen Intervallen analysiert wurde. In diesem Zustand fällt die Leistungsaufnahme des LTE-Modems erwartungsgemäß mit durchschnittlich 0,6 W am größten aus. Die große Streuung der elektrischen Leistungsaufnahme ist insbesondere auf verschiedene systeminterne Leistungsstufen des Signalverstärkers (power states) im Modem zurückzuführen.



**Abbildung 74:** Vergleich der Leistungsaufnahme des LTE-Breitbandmodems (Huawei ME909u) für unterschiedliche Betriebszustände (Idle: aktiv, nicht im Mobilfunknetz eingewählt / Verbunden: Mobilfunkverbindung, keine Datenübertragung / Kont. Datenübertragung: kontinuierliche Datenübertragung)

Beispielsweise wechselt das Modem in Abhängigkeit von Datenaufkommen und lokal vorherrschenden Kanalbedingungen stetig zwischen Sendebereitschaft bzw. zwischen verschiedenen Sendeleistungen, um die Dauer in einem Zustand mit hoher Leistungsaufnahme möglichst zu minimieren. Das Ziel dieses Ansatzes liegt folglich in der Reduktion der aufgenommenen mittleren elektrischen Energie.

**Tabelle 19:** Vergleich der akkumulierten Datenmengen für vier verschiedene Merkmalsvektoren und für das Klassifikationsergebnis (zusätzliche Übertragung von 12 Byte für Fahrtrichtung, Fahrzeuglänge und Geschwindigkeit)

	Rohdaten [Byte]	Kompletter Feature Vektor [Byte]	Feature Vektor 1 (Tabelle 12) [Byte]	Feature Vektor 2 (Tabelle 12) [Byte]	Klassifikationsergebnis [Byte]
Datentyp	char	float	float	float	float
Akkumulierte Datenmenge bei einer Durchfahrt	(Rohdaten aller 9 Verbindungen) 9 x 800	36	28	20	16

Tabelle 19 fasst die pro Fahrzeugdurchfahrt zu übertragenden Datenmengen bei Berücksichtigung von Rohdaten, unterschiedlich langen Feature Vektoren bzw. Klassifikationsergebnissen zusammen. Dabei ist zu beachten, dass neben dem eigentlichen Klassifikationsergebnis noch weitere Informationen (u.a. Fahrtrichtung, Fahrzeuglänge und Geschwindigkeit) übertragen werden müssen, um den in Abschnitt 4.1.4 genannten Anforderungen zu entsprechen. In diesem Fall müssen ebenfalls die aufgezeichneten RSSI-Zeitreihen von neun Funkverbindungen zwecks Feature Extraktion übertragen werden. Dies würde eine Übertragung von einer um den Faktor 450 größeren Datenmenge bedeuten. Auch bei einer Übertragung von Feature Vektoren beläuft sich der Unterschied der insgesamt zu übertragenden Datenmenge immer noch auf einen Faktor von etwa zwei.

## 4.5 FAZIT

Im Rahmen dieses Projektes hat der Lehrstuhl für Kommunikationsnetze der TU Dortmund die im Projektantrag aufgeführten Arbeitspakete in Synchronisation mit den Projektpartnern erfolgreich bearbeitet. Demzufolge wurden folgende Ziele erreicht:

### **1. Aufbau eines Simulationsumfelds für Radiotomographie**

Das aufgebaute Simulationsumfeld für Radiotomographie ermöglicht eine realitätsnahe Abbildung verschieden komplexer Verkehrsszenarien und eine anschließende Simulation der Ausbreitungscharakteristik der Funksignale mit Rücksicht auf unterschiedliche Kanaleigenschaften und Konfigurationen des Messsystems. Hierzu zählen beispielsweise Parametrisierungen von Sende- und Empfangseinheiten (u.a. Antennencharakteristiken), die essenzielle Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit des funkbasierten Klassifikationssystems haben können. Mit Hilfe der Simulationsumgebung wurde die Strahlenverfolgung (Raytracing) für eine Vielzahl an unterschiedlichen Verkehrssituationen und Systemkonfigurationen durchgeführt und die generierten Simulationsdaten nachfolgend für eine effiziente Leistungsbewertung unterschiedlicher Detektions- und Klassifikationsverfahren im Kontext der Fahrzeugerkennung angewandt.

### **2. Entwicklung und iterative Optimierung der Entscheidungsalgorithmen auf Basis von Musterklassifikationsverfahren**

Zwecks Fahrzeugdetektion und –klassifikation wurden verschiedene Klassifikationsalgorithmen aus dem Bereich des maschinellen Lernens eingesetzt und deren Leistungsfähigkeit in Bezug auf die Fahrzeugklassifikation untersucht. Als Ausgangsbasis stehen den Algorithmen die im Feld gemessenen oder mittels Raytracing-Simulationen generierten RSSI-Zeitverläufe (Rohdaten) bzw. aus diesen extrahierte Features (Attribute) einzelner Funkverbindungen des Messsystems als Eingabe zur Verfügung. Hierbei umfassen die abgeleiteten Features bspw. Abschätzungen von Fahrzeuglänge und Fahrgeschwindigkeit. Für die eigentliche Klassifikationsprozedur können entweder die Rohdaten oder eine Komposition mehrerer Features (Feature Vektor) als Eingabe für die Entscheidungsalgorithmen herangezogen werden. Im Anschluss an die Implementierung wurden die Entscheidungsalgorithmen mit Blick auf ihre Klassifikationsgenauigkeit und ihre an das Klassifikationssystem gestellten Anforderungen, wie benötigte Rechenleistung und Speicherplatzbedarf, bewertet. Diese Bewertung ist notwendig, um eine maßgeschneiderte Dimensionierung der Klassifikationskomponente vornehmen zu können. Die Leistungsfähigkeit der implementierten Klassifikationsverfahren wurde im Laufe dieser Projektphase unter iterativer Hinzunahme weiterer Mess- bzw. Simulationsdaten laufend analysiert und sich hierbei ergebende Schwachstellen bzw. Laufzeitengpässe behoben. Eine pauschale Aussage über die Klassifikationsgenauigkeit der untersuchten Entscheidungsalgorithmen lässt sich an dieser Stelle nicht treffen, da diese vor allem von Form und Genauigkeit der Eingabedaten (Rohdaten bzw. Feature Vektoren) abhängt.

### **3. Definition der Sensordatenstruktur**

Auch in Bezug auf die Definition einer effizienten Sensordatenstruktur zur Übermittlung von Messwerten respektive Klassifikationsergebnissen lässt sich keine allgemeingültige Aussage treffen. Die zu wählende optimale Sensordatenstruktur hängt u.a. davon ab, ob die eigentliche Fahrzeugklassifikation lokal beim Klassifikationssystem durchgeführt oder auf einen Cloud-Dienst ausgelagert wird. Im ersten Fall werden die vom Messsystem aufgezeichneten Rohdaten bzw. hieraus extrahierte Feature Vektoren an ein lokal installiertes Embedded System übermittelt, das die eigentliche Klassifikationsprozedur ausführt. Auf diese Weise findet eine Übertragung großer Datenmengen nur innerhalb des lokalen Klassifikationssystems statt, sodass primär nur Klassifikationsergebnisse über die gewünschten Breit-



bandkommunikationswege übertragen werden müssen. Wird stattdessen der Ansatz einer Cloud-basierten Klassifikationslösung betrachtet, so müssen die bei der Durchfahrt eines Fahrzeuges durch das Messsystem aufgezeichneten Rohdaten bzw. hieraus extrahierte Features vollständig über die vorhandenen Breitbandschnittstellen an die entsprechenden Cloud-Dienste übertragen werden. Dementsprechend setzt sich das akkumulierte Datenvolumen entweder aus RSSI-Zeitreihen oder aus Feature Vektoren zusammen, wobei letztere eine signifikante Reduktion des Datenvolumens ermöglichen. Losgelöst von den deutlichen Unterschieden im Hinblick auf die resultierende Datenmenge, können mit Rohdaten und Feature Vektoren vergleichbare Klassifikationsergebnisse bei Nutzung der Entscheidungsalgorithmen k-Nearest-Neighbor, Neuronales Netz und Support Vector Machine erzielt werden (s. Abschnitt 4.1.5.6). Auch die Wahl von Zahlenrepräsentation (Ganzzahl- bzw. Fließkommadarstellung) und –auflösung hat keine nennenswerten Unterschiede bzgl. der Klassifikationsgenauigkeiten zur Folge (Abschnitt 4.3.2, Tabelle 16). Demnach empfiehlt sich mit Blick auf eine Minimierung des Datenvolumens die Verwendung eines möglichst kurzen Feature Vektors.

#### **4. Überführung der Algorithmik auf Hardware und Validierung der Verfahren durch Feldtests**

Im Anschluss an Implementierung und Leistungsbewertung wurden die Entscheidungsalgorithmen mitsamt der jeweils geeigneten Sensordatenstrukturen in Zusammenarbeit mit der Firma Wilhelm Schröder GmbH auf eingebettete Systeme überführt. Der eigentliche Kern dieses Vorhabens bestand in der korrekten Hardwaredimensionierung des eingebetteten Systems, sodass die Einhaltung von für die Fahrzeugklassifikation essenziellen Vorgaben (u.a. Echtzeitfähigkeit) garantiert werden kann (Abschnitt 0). Im Zuge der Algorithmenportierung wurden weitere Aspekte, die sich durch den Betrieb einer lokalen Klassifikationslösung ergeben, untersucht. Hierzu zählen eine durch die Sensordatenstruktur bedingte Speicherbedarfs- (Abschnitt 4.3.2) und Laufzeitanalyse für verschiedene Klassifikationsalgorithmen (Abschnitt 4.3.3) als auch eine umfassende Energiebilanzierung des Gesamtsystems bestehend aus Funksensorik (Abschnitt 0), eingebettetem System (Abschnitt 4.4.2) und LTE-Breitbandmodul (Abschnitt 4.4.3). Erwartungsgemäß hat die Form des zugrunde liegenden Datensatzes (Rohdaten bzw. Feature Vektoren) einen unmittelbaren Einfluss auf Speicherbedarf und resultierende Klassifikationslaufzeiten. So können bei Verwendung von Feature Vektoren beide Aspekte minimiert werden, während die Speicherung von Rohdaten unmittelbar zu einem signifikanten Anstieg des benötigten Speicherplatzes führt. Allerdings geht mit dem größeren Datensatz nicht zwangsläufig ein Anstieg der Klassifikationslaufzeiten einher. Lediglich bei Nutzung von kNN und SVM liegen die Laufzeitunterschiede in der Größenordnung von Faktor 4,33 respektive Faktor 3. Der Grund für diese Differenzen liegt in der Funktionsweise beider Verfahren. Während ein Merkmalsvektor größerer Dimension bei dem kNN-Algorithmus eine Distanzberechnung für eine größere Anzahl an Punkten (Nachbarn) zur Folge hat, so steigt im Fall der SVM die Menge benötigter Support Vektoren an. Aus der sich hieraus ergebenden anwachsenden Komplexität resultiert eine ebenfalls steigende Berechnungslaufzeit. Im Gegensatz dazu ergeben sich bei Anwendung von NN bzw. DT keine nennenswerten Differenzen der Klassifikationslaufzeiten, da für diese Verfahren keine Korrelation zwischen der Dimension des Merkmalsvektors und der resultierenden Laufzeit besteht. So ist die Laufzeit im Fall des DT-Algorithmus alleine von der Tiefe des binären Baumes beziehungsweise von der Anzahl der Entscheidungsknoten abhängig. Dementsprechend sind die Neuronalen Netze, insbesondere bei der Verwendung größerer Datensätze mit mehreren 10000 Fahrzeugen, zu präferieren. Anhand der in Abschnitt 4.1.5.6 für verschiedene Klassifikationsverfahren und Eingabedaten (Rohdaten bzw. Feature Vektoren) gezeigten Klassifikationsergebnisse ist ersichtlich, dass die Kombination von SVM und Rohdaten mit 99,47% zur höchsten Klassifikationsgenauigkeit führt. Im direkten Vergleich dazu beläuft sich die geringste Klassifikationsgenauigkeit auf 98,53%, was einer geringen Abweichung von 0,94 % entspricht. Allerdings können diese geringfügigen Abweichungen auch von den pseudozufälligen Permutationen im Zuge der Generierung von Trainings- und Testdaten herrühren und sind somit vernachlässigbar. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die durch die Zertifizierungsvor-

schrift vorgegebenen Klassifikationsgenauigkeiten durch das im Rahmen dieses Projektes entwickelte Klassifikationssystem erfüllt werden.

#### 4.6 LITERATURVERZEICHNIS TU DORTMUND

- [1] J. Friedman, T. Hastie und R. Tibshirani, *The Elements of Statistical Learning*, 2009.
- [2] S. Marsland, *Machine Learning: An Algorithmic Perspective*, 2015.
- [3] „RapidMiner,“ 2017. [Online]. Available: <https://rapidminer.com/>.
- [4] „Matlab,“ 2017. [Online]. Available: <https://de.mathworks.com/>.
- [5] „Scikit-Learn,“ 2017. [Online]. Available: <http://scikit-learn.org/stable/>.
- [6] M. Haferkamp, M. Al-Askary, D. Dorn, B. Sliwa, L. Habel, M. Schreckenberger und C. Wietfeld, *Radio-based Traffic Flow Detection and Vehicle Classification for Future Smart Cities*, Sydney, 2017.

## 5 CLOUD-BASIERTE DATENANALYSE UND –VERARBEITUNG

**Verantwortlicher Partner:** FH Dortmund

Dieser Abschnitt beschreibt die geleisteten Arbeiten der FH Dortmund in Bezug auf die Realisierung der Smart-Data-Plattform. Seine Gliederung orientiert sich an den im Projektantrag aufgeführten Arbeitspaketen (APs) und führt des Weiteren wesentliche Änderungen in Bezug auf den Zwischenbericht auf.

### 5.1 AUSWAHL UND EINRICHTUNG DER BETRIEBS- UND ENTWICKLUNGS-TECHNOLOGIEN (AP2, AP3)

Im Rahmen des APs 2 wurden die für das Projekt relevanten Technologien zum Betrieb und für die Entwicklung der Smart-Data-Plattform ausgewählt. Hierbei wurden die in Tabelle 15 gelisteten Betriebstechnologien bestimmt.

**Tabelle 20:** Übersicht der ausgewählten Technologien für den Betrieb der Smart-Data-Plattform

Bereich	Ausgewählte Technologien	Begründung
Datenspeicherung	MySQL 5.7.12 Hibernate	Als Datenbanksystem für die Speicherung von statischen Daten wie konfigurierten Parkplätzen und dynamischen Sensordaten kam die relationale Datenbank MySQL zum Einsatz. Der Objekt-Relationale-Mapper Hibernate wird als Abstraktionsebene für MySQL eingesetzt, um perspektivisch andere Datenbanken nutzen zu können, ohne große Teile des Quellcodes erneut anpassen zu müssen. Hierdurch kann die Datenbank und die zugrundeliegende Technologie ausgetauscht werden, ohne dass wesentliche Teile der Applikationslogik angepasst werden müssen.
Applikationsserver	WildFly 9.0.2.Final	Zum Betrieb der Plattform kommt der Applikationsserver WildFly 9.0.2.Final in Kombination mit Java EE 7 zum Einsatz. Hierbei handelt es sich um die in der Praxis etablierten Technologien zur Umsetzung komponentenbasierter Enterprise-Software im Java-Umfeld.

Während im Zwischenbericht noch Apache Storm als geeignetes System für eine zeitnahe Datenverarbeitung aufgeführt wurde, wurden im Projektverlauf anstelle des Frameworks die standardkonformen Java EE Funktionalitäten mit Java Messaging Service (JMS) genutzt. Ebenso wurde von der Idee eine NoSQL-Datenbank einzusetzen Abstand genommen. Grundsätzlich eignen sich NoSQL Datenbanken wie MongoDB für eine Vielzahl von Anwendungsfällen, wo große Datenmengen anfallen. Jedoch ist eine Verarbeitung von vielen einzelnen Dokumenten mit sogenannten Joins (dem Zusammenführen von Dokumenten) und anderen Möglichkeiten der Zusammenführung vergleichsweise langsam. Daher wurde im Projektverlauf in späteren Phasen ausschließlich eine MySQL-Datenbank eingesetzt. Diese wurde allerdings nur auf einer abstrakten Ebene durch einen Objekt-Relationalen-Mapper namens Hibernate genutzt.

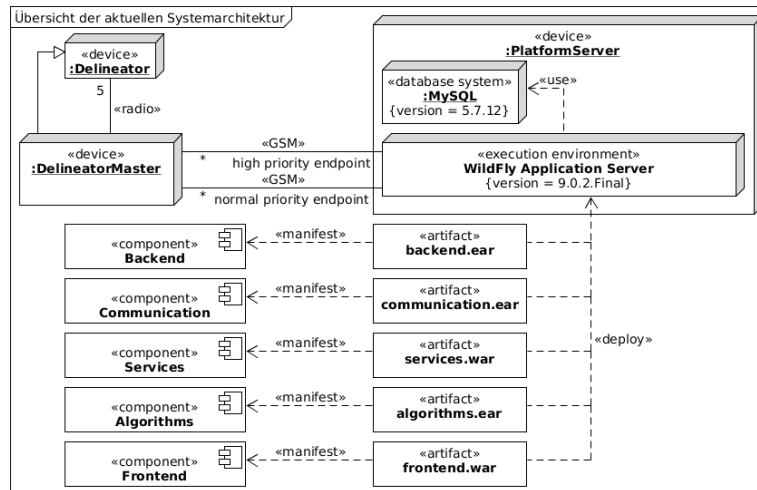
Für die Entwicklungsumgebung und den Auslieferungsprozess neuer Entwicklungsartefakte wurde die benötigte Infrastruktur in einzelne Bereiche, für die jeweils unterschiedliche Tools verwendet werden, aufgeteilt: Versionsverwaltung, Integrationsverwaltung, Aufgabenmanagement, Quellcode-Vereinheitlichung. Tabelle 21 zeigt die verwendeten Technologien je Bereich.

**Tabelle 21:** Ausgewählte Werkzeuge für die Entwicklungsumgebung je Infrastrukturbereich

Bereich	Ausgewählte Tools	Erläuterung
Versionsverwaltung	git, Bitbucket	<p>Für die Verwaltung des Plattform-Quellcodes inkl. Historie wurde das Open-Source-Programm git aufgrund seiner Geschwindigkeit, der Unterstützung verteilter Entwicklung in Teams insbesondere durch sog. „Wegwerf-Branche“ und Tags sowie der guten Benutzbarkeit ausgewählt. Bei Bitbucket handelt es sich um eine webbasierte Software für den Betrieb eines git-Servers, die zentrale Verwaltung von git-Repositories und die Durchführung von Code-Reviews.</p> <p>Diese Arbeitsweise wurde nach der Einführung über die gesamte Projektdauer hinweg genutzt. Durch diese Arbeitsweise ließen sich beispielsweise Bugs leichter lokalisieren und ihre Auswirkungen einschätzen.</p>
Aufgabenmanagement	JIRA	<p>Als Ticket- und Workflowsystem für das Management der Plattformentwicklung kommt JIRA zum Einsatz. Durch die Verknüpfung von Bitbucket und JIRA kann der Quellcode in Bezug zu Feature Requests und Bugfixes gesetzt werden.</p>
Quellcode-Vereinheitlichung	CheckStyle	<p>Mit Hilfe von CheckStyle können Regeln definiert werden, die gewisse Eigenschaften des Plattform-Quellcodes prüfen und ggf. Fehler anzeigen, wenn der entwickelte Code nicht den Regeln entspricht. Dies trägt zu einer Verbesserung der Quellcode-Qualität im Rahmen der verteilten Softwareentwicklung bei.</p> <p>Diese Regeln wurden im Vergleich zum Zwischenbericht erweitert und an neue Bedürfnisse wie beispielsweise im Frontend angepasst, sodass es nun für die grafische Oberfläche ein zusätzliches, eigenes Regel-Set gibt, welches insbesondere auf die Bedürfnisse der Entwicklung und Formatierung bei der grafischen Oberfläche Rücksicht nimmt.</p>

## 5.2 ENTWICKLUNG DER KOMPONENTEN DER SMART-DATA-PLATTFORM (AP4, AP5, AP6, AP7)

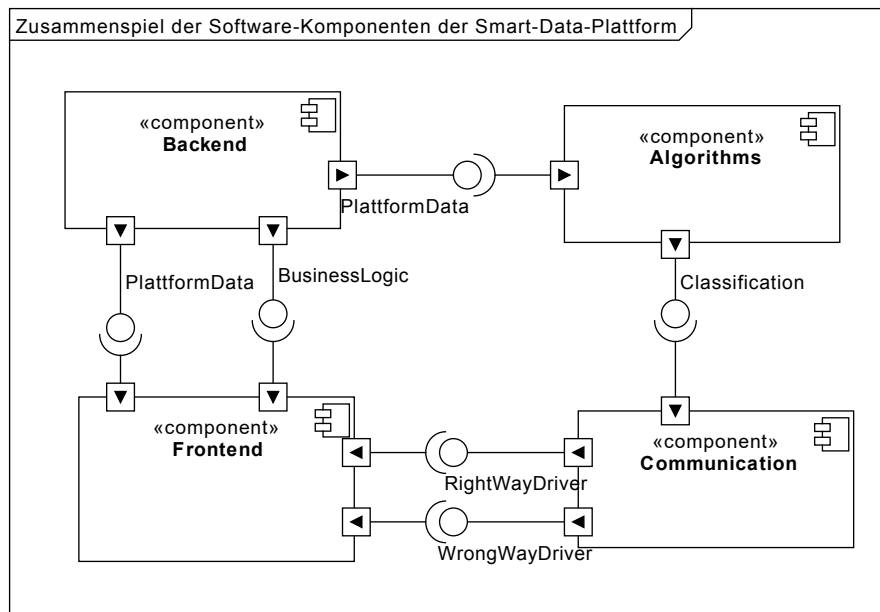
Abbildung 75 zeigt eine Übersicht der aktuellen Systemarchitektur der Smart-Data-Plattform als UML-Verteilungsdiagramm.



**Abbildung 75:** Übersicht der aktuellen Systemarchitektur

Die *devices* *Delineator* und *DelineatorMaster* repräsentieren die straßenseitige Sensorik, d. h. die Leitpfosten einer Gruppe und den zugehörigen Master-Leitpfosten. Dieser ist durch einen Endpunkt, dem *high priority endpoint*, mit dem *PlatformServer* verbunden (siehe Antrag AP7). Auf dem *PlatformServer* wurden mit der MySQL-Datenbank (*database system*) und dem WildFly-Applikationsserver (*execution environment*) zwei Technologien installiert, welche sich im Rahmen der Evaluation des AP2 als für das Projekt geeignet herausgestellt haben (siehe Unterabschnitt 5.1). Auf eine Nutzung des *normal priority endpoint* wurde verzichtet, da mittels JMS auf Seiten des WildFlyApplikation Servers eine effektive Möglichkeit besteht Daten effektiv der Reihe nach zu bearbeiten, sodass für Parkplatzbilanzierungen dies vollkommen ausreichend ist. Durch die Flexibilität von JMS und der entsprechenden Konfiguration in der entwickelten Plattform und des Applikationsservers ist es jedoch auch möglich perspektivisch auch einen *normal priority endpoint* zu installieren. Bisher wird – im Hardware Modul konfigurierbar – eine fixe Anzahl an Durchfahrten an die Plattform übermittelt (oder es wurde eine gewisse Zeitdauer überschritten). Hier wäre es beispielsweise denkbar, die Hardware entsprechend anzupassen, so dass diese bei einem Falschfahrer sofort die entsprechende Durchfahrt über einen gesonderten Endpunkt an die Plattform übermittelt.

Die Plattform selbst besteht aus den auf der Java-EE-Technologie basierenden *artifacts* bzw. Software-Komponenten *Backend*, *Communication*, *Services*, *Algorithms* und *Frontend*. Bevor jede Komponente mit Bezug zum Projektantrag beschrieben wird, zeigt Abbildung 76 das konzeptionelle Zusammenwirken der Komponenten.



**Abbildung 76:** Zusammenspiel der Plattformkomponenten als UML-Komponentendiagramm

## BACKEND-KOMPONENTE

Die Backend-Komponente stellt den anderen Plattformkomponenten die Schnittstellen `PlatformData` und `BusinessLogic` zur Verfügung. `PlatformData` realisiert unter Verwendung des objektrelationalen Mappers Hibernate den objektorientierten Zugriff auf die Plattformdatenbank. Das mit Berücksichtigung des Beispielszenarios „Parkraumüberwachung“ entwickelte Datenmodell zeigt Abbildung 77.

Die Backendkomponente stellt die Umsetzung der Applikationslogik dar. Innerhalb der Backendkomponente finden sich sämtliche Funktionen für einen Zugriff auf persistent vorgehaltene Klassen/Daten. So können Klassen wie ein Parkplatz oder ein Messsystem erstellt, eingelesen, aktualisiert oder gelöscht werden. Diese Operationen (Create, Read, Update, Delete – kurz CRUD) werden durch Data Access Objects (DAOs) zugänglich gemacht. Durch dieses Konstrukt wird es möglich, z. B. einen Parkplatz oder ein Messsystem zu verändern, darzustellen oder zu aktualisieren. Während die Umsetzung in einem einfachen Fall von unabhängigen Klassen eine einfache Aufgabe ist, wird diese Aufgabe mit einer zunehmenden Anzahl voneinander abhängiger Klassen, zunehmend komplex. So ist bei der Persistierung der Instanz einer Parkplatz-Klasse zu beachten welche Klassen mit dieser in Zusammenhang stehen. Für die Neuanlage eines Parkplatzes (ParkingArea) muss so zunächst ein Messsystem (MeasurementSystem) und kein Kunde (customer) vorhanden sein. Für die Anlage eines Messsystems wiederum sind Leitpfosten (DelineatorPost) vorher erforderlich. Die Abhängigkeiten ergeben sich aus dem Datenmodell in Abbildung 77. Diese Zusammenhänge sind bei jeder Operation zu beachten, da die Beziehungen unabhängig von der auszuführenden Operation im Datenmodell definiert sind. Insbesondere das Löschen innerhalb der Objektkette ist vergleichsweise aufwendig. Die umgesetzten DAOs erlauben i. d. R. auf jedem der gezeigten Entitäten die Operationen für CRUD.

Um zielgerichteter und effektiver mit den Daten operieren zu können, stellen die DAOs weitere Funktionalitäten bereit. So können diese insbesondere Daten nach bestimmten Bedingungen gefiltert lesen. Ein Beispiel hierfür ist die Information über die Anzahl an Einfahrten zwischen zwei Datumswerten. Hierfür und für alle anderen realisierten Abfragen wurde die QueryDSL<sup>8</sup> eingesetzt, ein Framework, welches es erlaubt, Typsicherheit bei der Definition von Abfragen zu erreichen. Dies ist insofern bemerkenswert, da bei der Verwendung von direkten Abfragen auf Basis der Java Persistence API oder

<sup>8</sup> <http://www.querydsl.com/>



direkter Datenbank-Abfrage-Sprachen wie SQL keine Überprüfung der Typen gegeben ist. So wird in letzterem Fall erst zur Laufzeit bei einer Ausführung ein Typfehler auffallen. Mit Techniken und Frameworks wie QueryDSL ist dies vermeidbar.

#### Datenentgegennahme und Veröffentlichung

Um Daten möglichst in Echtzeit verarbeiten zu können, wurde vom Java Messaging Service (JMS) Gebrauch gemacht. So ist es innerhalb des eingesetzten Application Servers möglich, Topics/Queues zu definieren. Hierbei handelt es sich um Datenstrukturen, welche ein Verarbeiten und Veröffentlichendes von sich registrierenden Komponenten ermöglicht. Dies wird zum einen innerhalb der entwickelten Cloudplattform für die Entgegennahme von Vektoren verwendet. Es ist aber auch so, dass über einen erfolgten verarbeiteten Vektor ein neues Topic erzeugt werden kann. Dies erleichtert die perspektivische Anbindung weiterer Dienste wie dem MDM Portal, da nun datensparsam nur noch auf veränderte Werte reagiert werden muss.

Das Datenmodell bildet zunächst die physischen Gegebenheiten der straßenseitigen Sensorik ab, wie sie zuvor in dem Zwischenbericht dargestellt wurde: Ein Leitpfosten (`DelineatorPost`) ist Teil einer aus sechs Pfosten bestehenden Gruppe (`DelineatorGroup`). Die Pfosten innerhalb einer Gruppe bauen mittels Radiotomographie Verbindungen (`DelineatorConnection`) zu mindestens zwei und maximal drei anderen Pfosten auf. Eine Gruppe von Pfosten ist den Ein- und Ausfahrten (`entryGroup`, `exitGroup`) eines Parkplatzes (`ParkingArea`) zugeordnet. Die durch eine Pfostengruppe auf Basis der gesammelten Rohdaten abgeleiteten Klassifizierungsinformationen werden aufgrund der zukünftig angestrebten Erweiterung gemäß TLS 2012 5+1 eingeteilt und mit der Gruppe über die Assoziation `classificationResults` verknüpft.

Im Projektverlauf wurden hiervon PKW und LKW genutzt. Das Ergebnis einer Klassifizierung (`ClassificationResult`) basiert auf der Abbildung der Sensordaten auf Vektoren (`Vector`) und den einer Verbindung zugehörigen Messdaten (`ConnectionMeasure`).

Einem Parkplatz sind Standort- und Kontaktinformationen (`Location` bzw. `Contact`) zugeordnet. Darüber hinaus wurden einige der in der DATEX-II-Spezifikation definierten Merkmale für die Beschreibung der Parkplatzausstattung (`EquipmentInformation`) und der installierten Serviceeinrichtungen (`ServiceFacilityInformation`) übernommen (siehe auch die Erläuterungen zur `Services`-Komponente). Das Datenmodell kann um weitere Szenarien ergänzt werden, indem die szenariospezifischen Fachmodelle per Assoziation mit `DelineatorGroup`, d. h. den technischen Modellen, verknüpft werden.

Neu hinzugekommen sind Möglichkeiten zur Modellierung von Parkplatz-Öffnungszeiten (`WeeklyOccurringTimeInterval`). Diese werden einem Parkplatz zugeordnet. Hiermit kann eine tägliche Öffnungszeit modelliert werden, wie bspw. Montag – Freitag von 06:00 bis 20:00 Uhr geöffnet. Diese Zeitangaben können auch für Kontakte, als `workingTimes`, genutzt werden und dienen der perspektivischen Möglichkeit, nur aktuell erreichbare Kontakte anzuzeigen.

Des Weiteren wurden Parkplatzausstattungen erweitert und ergänzt. Dies betrifft primär die Erweiterung um Sicherheitsaspekte (`SecurityType`). Hiermit lassen sich DATEX-II-konform Parkplätze mit Sicherheitsfunktionalitäten wie Flutlicht, Überwachungskamera, Wachmann beschreiben. Dies wird durch die DATEX-II-konforme Beschreibung von Wegen (`Road`) ergänzt.

Weitere Neuerungen betreffen die Benutzerverwaltung (`Customer`) und die Parkplatzkalibrierung (`CalibrationConfiguration`). Die Notwendigkeit der Benutzerverwaltung ergibt sich daraus, dass es unterschiedliche Parkplatzbetreiber gibt und diese nicht auf sämtliche Systeme zugreifen dürfen. Die Parkplatzkalibrierung ermöglicht das konkrete Festlegen einer Parkplatzbelegung zu einer bestimmten Zeit. Z.B. könnte bei Parkplätzen durch Aufräumarbeiten/Sperrungen o.Ä. sichergestellt sein, dass ein Parkplatz komplett leer ist. Somit ist an dieser Stelle sichergestellt, dass Fehlerkennun-

gen nicht die Parkplatzbilanzierung beeinflussen. Mit der Parkplatzzalibrierung kann z.B. jeden Montag zu einer wählbaren Uhrzeit die Parkplatzzbelegung auf einen bestimmten Wert festgesetzt werden. Die Parkplatzzalibrierung hat sich nach kurzer Zeit als sinnvoll herausgestellt, da nicht jede Fahrt zwangsweise über die Strecke mit den Leitpfosten erfolgt (z. B. bei Rangierfahrten) und nicht jede Fahrt mit einer Durchfahrtsrichtung erkannt wird.

Darüber hinaus wurde im Rahmen des Projektes festgestellt, dass eine korrekte, algorithmische Auswertung in unterschiedlichen Einsatzzwecken und Kontexten unterschiedliche Algorithmen zur Auswertung erforderlich macht. Daher wurde zur Erkennung von Fahrzeugtypen ParkingClassification eingeführt. Hierdurch wird ein anderer Auswertungsalgorithmus der Wilhelm Schröder GmbH für städtische Szenarien gewählt, in welchen bspw. Fußgänger durch die Leitpfosten gehen, als für den Einsatz des Systems an Autobahnen mit deutlich höheren Fahrzeuggeschwindigkeiten.

Um das System insgesamt flexibler zu gestalten, wurde ebenso die Möglichkeit geschaffen, die Abstände der Leitpfosten flexibel zu konfigurieren. Dies geschah innerhalb des Messsystems (MeasurementSystem). Eine Erweiterung um eine Fahrzeug-Zähl-Konfiguration (VehicleCountCalculationConfiguration) ermöglicht es, Parkplätze flexibel um weitere Ein-, Aus- und Zufahrten zu ergänzen. So kann an einem Parkplatz eine Straße sowohl als Ein- und als Ausfahrt fungieren. Hierbei ist die Fahrtrichtung des Fahrzeugs entscheidend für die spätere Belegung des Parkplatzes. Andere Straßen können ggf. nur in eine Richtung durchfahren werden und müssen entsprechend hinsichtlich der Zählweise konfiguriert werden. Dies wird durch das implementierte Konzept innerhalb der Plattform realisiert.

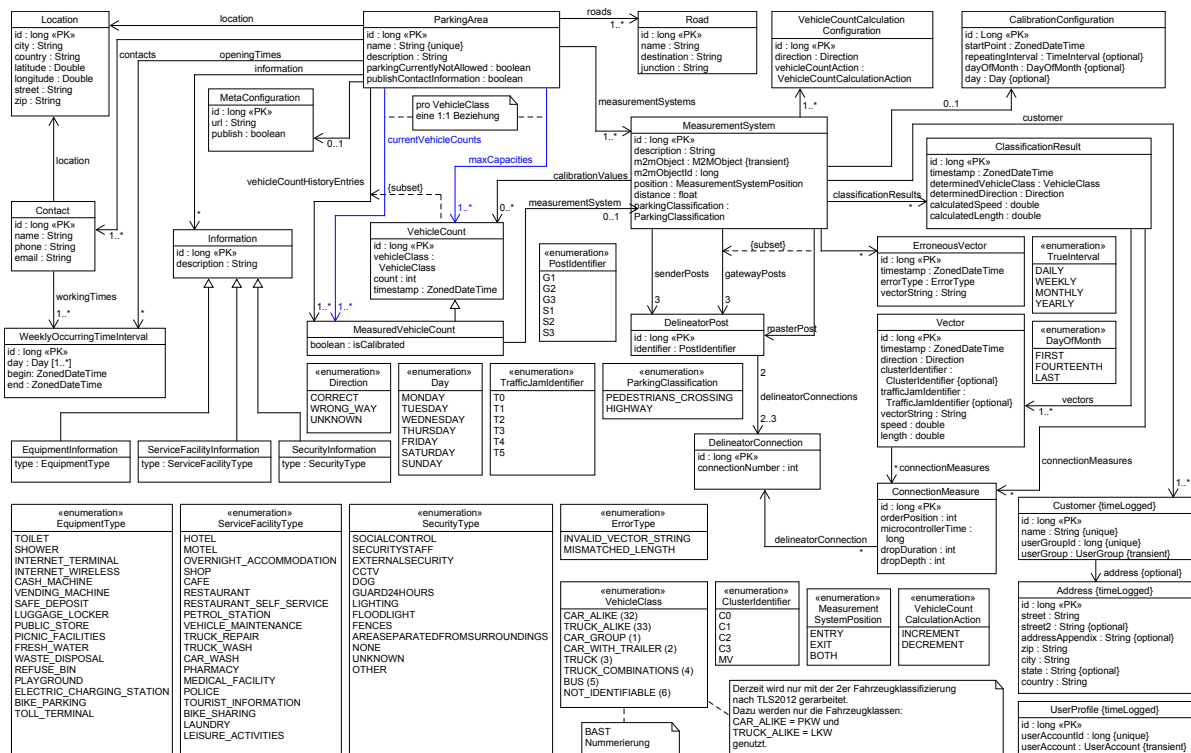


Abbildung 77: Derzeitiges Datenmodell der Anwendung

Die Schnittstelle BusinessLogic der Backend-Komponente stellt Methoden zur Verfügung, welche die Geschäftslogik der Plattform, bspw. die Berechnung freier Stellplätze oder der durchschnittlichen Auslastung eines Parkplatzes, realisieren. Die BusinessLogic umschreibt hierbei abstrakt eine Vielzahl von Klassen, welche einen Zugriff auf das Datenmodell erlauben. So ist unter anderem eine Abfrage von Parkplatzzbelegungen über einen Zeitraum von einem bestimmten Parkplatz möglich. Es besteht darüber hinaus die Möglichkeit, Durchfahrten von Fahrzeugen in einem Zeitraum auszuwählen und basierend hierauf eine weitere Verarbeitung vorzunehmen. Erwähnenswert sind auch die Mög-

lichkeiten, zu den einzelnen Parkplätzen sämtliche verbundene Entitäten (Location, Messsysteme, Öffnungszeiten und Konfigurationen) abzufragen.

## PARSER-KOMPONENTE

Die Parser-Komponente ist eine Teil-Komponente des Backends. Sie wird benötigt, um aus einer generischen Zeichenkette das Datenmodell, welches zuvor dargestellt wurde, aufzubauen. Der Parser für das Übertragungs- und Vektorformat wurde durch die FH Dortmund fertiggestellt. Dieser ist an den relevanten Stellen flexibel gestaltet, sodass Optimierungen am Vektorformat in kurzer Zeit berücksichtigt werden können. Der Parser prüft, ob die Vektoren syntaktisch korrekt aufgebaut sind und überführt diese in das Datenmodell zur Darstellung und Persistierung der Vektordaten. Vektoren, die die Syntaxprüfung nicht bestehen, werden erkannt und zwecks Fehlerfindung und Nachvollziehbarkeit der Daten gesondert im Datenmodell als fehlerhafte Vektoren gespeichert. Es können somit Vektordaten über die Plattformkomponente hochgeladen und an den Parser übergeben werden. Dieser verarbeitet und überprüft die Daten, anschließend werden sie in der Datenbank persistiert.

**Zusammenfassung des aktuellen Stands der Backend-Komponente:** Das technische Datenmodell zur Beschreibung der Anbindung der straßenseitigen Sensorik und das fachliche Datenmodell der Parkraumüberwachung sind jeweils vollständig implementiert. Sensordaten und Parkplatzinformationen können auf Ebene des Datenmodells gespeichert und abgerufen werden. Weitere Geschäftslogik wurde im Hinblick auf das Beispielszenario im Projektverlauf zur Backend-Komponente hinzugefügt, wie die deutliche Erweiterung des Datenmodells im Vergleich zum Zwischenbericht zeigt.

## COMMUNICATION-KOMPONENTE

Innerhalb der Communication-Komponente findet die Verarbeitung von über die straßenseitige Sensorik eingegangenen Sensordaten statt. Dies geschieht sowohl für Falsch- als auch Richtigfahrer. Die ursprüngliche Behandlung über die Schnittstellen `HighPriorityEndpoint` und `NormalPriorityEndpoint` wurde verworfen und durch einen nachrichtenbasierten Ansatz mit JMS ersetzt. Hierbei werden nach einer Klassifizierung die Fahrten separat für Falsch- und Richtigfahrer durch sogenannte Topics mitgeteilt. Dies ermöglicht die Anbindung an weitere Komponenten, um flexibel auf Falschfahrer und andere Szenarien bei Durchfahrten reagieren zu können.

Die pro Pfostenverbindung erfassten Sensordaten werden vom Kommunikationsmodul im Master-Leitpfosten zu einem Vektor zusammengefasst und zur Übertragung an die Plattform in die Strukturen des weiter unten beschriebenen Protokolls gekapselt. Ein Beispiel für einen übermittelten Vektor zeigt Listing 1.

```
R;C0;1;2;4;5;6;8;9;S;15076786;108;209;436;583;697;920;D;983;1046;1118;1063;1066;1179;1177;L;21;20;21;18;23;24;19
```

**Listing 1:** Beispiel eines übertragenen Vektors

Die Semikola trennen einzelne Informationen voneinander. Der erste Buchstabe gibt an, in welcher Richtung eine Pfostengruppe durchfahren wird. Hier können die Buchstaben `R` (Richtigfahrer), `F` (Falschfahrer) oder `P` (Fehler bei der Richtungsbestimmung) auftreten. Das zweite Feld bestimmt die Anzahl der zu einer Messung gehörenden Vektoren. Es kann die Werte `C0` bis `C3` annehmen. Die folgenden Ziffern bis zur Marke `S` stellen die Verbindungen und die Reihenfolge ihres Einbruchs dar. Hinter `S` stehen der zugehörige Mikrocontroller-Zeitstempel und die auf diesen bezogenen Differenzen für die jeweiligen Verbindungseinbrüche. Beginnend mit der Marke `D` folgen die Werte für die Einbruchdauer in Millisekunden. Hinter der Marke `L` stehen abschließend die Einbruchtiefen der einzelnen Verbindungen.

Nach abgeschlossenem Parsing eines über die jeweilige `Endpoint`-Schnittstelle der `Communication`-Komponente eingegangenen Vektors wird dieser unter Nutzung der `PlatformData`-Schnittstelle der `Backend`-Komponente im Datenmodell gespeichert. Den Zusammenhang zwischen den Bestandteilen eines Vektors und den Datenfeldern der technischen Modelle in Abbildung 77 zeigt Tabelle 22.

**Tabelle 22:** Abbildung der Vektorwerte auf die technischen Elemente des Datenmodells

Art des Datums	Technisches Modell	Datenfeld
Anzahl Vektoren	Vector	clusterIdentifizier
Richtung	Vector	direction
Mikrocontroller-Zeitstempel	Vector	timestamp
Einbruchtiefe	ConnectionMeasure	dropDepth
Einbruchdauer	ConnectionMeasure	dropDuration
Verbindungen und Einbruchsreihenfolge	ConnectionMeasure	orderPosition

Die Berechnung der Datenfelder `Vector.length`, `Vector.speed` und `ClassificationResult.vehicleClass` aus einem eingegangenen Vektor wurde im weiteren Projektverlauf in die Smart-Data-Plattform integriert.

Um die Größe der übertragenen Daten und den Energieverbrauch der straßenseitigen Sensorik weiter zu optimieren, basiert die Kommunikation zwischen Master-Leitpfosten und Smart-Data-Plattform auf einem zustandslosen Übertragungsprotokoll. Es unterscheidet die folgenden Arten von ausgetauschten Informationen: Sensordaten (Vektoren), Nachrichten (Fehler und Informationen zum Betriebszustand), Konfigurationsbefehle (Anzahl gepufferter Vektoren, Sendeintervall). Die Unterscheidung der Informationsart geschieht durch eine zwei Byte umfassende Kodierung. Dies resultiert im Vergleich zur Übertragung vollständiger Zeichenketten in einer Reduktion der ausgetauschten Daten und einem geringeren Overhead. Ferner erlaubt die Byte-Kodierung die einfache Weiterverarbeitung der Daten in der Plattform, da keine zusätzlichen Operationen, z. B. zum Filtern der Informationsart eines Datensatzes, erforderlich sind. Die Semantik der Kodierung ist dabei auf Sender- und Empfängerseite identisch. Des Weiteren werden mehrere Vektoren im Master-Leitpfosten gepuffert und zusammengefasst in einem Netzwerkpaket versendet. Dies reduziert, verglichen mit dem Versand nur eines Vektors pro Netzwerkpaket, den durch die eingesetzten Low-Level-Netzwerkprotokolle entstehenden Daten-Overhead noch einmal zusätzlich. Die Smart-Data-Plattform verarbeitet dabei ausschließlich die Sensordaten (Vektoren). Es ist jedoch möglich, perspektivisch auch weitere Funktionalitäten zu realisieren und Nachrichten und Konfigurationsbefehle in zukünftigen Entwicklungen zu berücksichtigen.

Während im Zwischenbericht noch Priority Queues und Java Message Service miteinander verglichen wurden, wurde letztlich der Java Message Service positiv für eine Behandlung von priorisierten Nachrichten evaluiert. Die JMS-Technik eignet sich grundsätzlich für den Einsatz im Kontext datensparsamer Mobilkommunikation<sup>9</sup>. Im Gegensatz zu Priority Queues unterscheidet JMS standardmäßig nicht nach unterschiedlichen Prioritäten. Dennoch war eine nähere Betrachtung dieses Ansatzes sinnvoll, da die Information, ob der eingegangene Vektor einen Falschfahrer repräsentiert, bereits bei Eingang der Daten über die entsprechende `Endpoint`-Schnittstelle vorhanden ist. Daher muss die Verwaltung der Priorität nicht zwangsweise über eine Queue-Datenstruktur erfolgen. Vielmehr können mittels JMS erhaltene Falschfahrermeldungen direkt bei Eingang durch einen `TopicPublisher`<sup>10</sup> an andere Komponenten, wie `Services` und `Frontend` (siehe unten), welche als `TopicSubscriber`<sup>11</sup> registriert sind, propagiert werden. Dadurch besteht die Möglichkeit, die Informationen zu den Falschfahr-

<sup>9</sup> Kuehnhausen, M. and Frost, Victor S. (2011): Application of the Java Message Service in mobile monitoring environments, *Journal of Network and Computer Applications* 34(5), Elsevier, S. 1707-1716.

<sup>10</sup> <http://docs.oracle.com/javaee/7/api/javax/jms/TopicPublisher.html>

<sup>11</sup> <http://docs.oracle.com/javaee/7/api/javax/jms/TopicSubscriber.html>

ren direkt in diesen Komponenten auszuwerten. Dies ermöglicht es bspw. in späteren Projektphasen, Falschfahrmeldungen kurz nach deren Eintreffen in der grafischen Oberfläche einzublenden. Dieses Verfahren wurde bevorzugt, da dies auch perspektivische Vorteile bietet, um in möglichen nachfolgenden Projekten eine ereignisbasierte Kommunikation zu ermöglichen. Dies kann bspw. bei dem Einbinden in das MDM-Portal vorteilhaft sein.

**Zusammenfassung des aktuellen Stands der Communication-Komponente:** Der Parser für das Übertragungs- und Vektorformat wurde fertiggestellt. Dieser ist an den relevanten Stellen flexibel gestaltet, sodass Optimierungen am Vektorformat in kurzer Zeit berücksichtigt werden können. Die FH Dortmund hat die geplante Integration von JMS und die Verteilung der Daten nach ihrem Eingang an die verarbeitenden Plattformkomponenten prototypisch durchgeführt.

## SERVICES-KOMPONENTE

Die `Services`-Komponente kapselt Datenschnittstellen, welche die Plattform externen Clients zur Verfügung stellt. Sie nutzt beide `Backend`-Schnittstellen, um einerseits auf persistierte Daten zuzugreifen und andererseits Geschäftslogik, etwa für Berechnungen, aufrufen zu können. Ferner verwendet sie die Schnittstelle `AlgorithmInvocation` der `Algorithms`-Komponente, um auf deklarativ beschriebene Algorithmen zur Datenverarbeitung zuzugreifen und diese ausführen zu können (siehe unten). Um hochpriorisierte Daten externen Clients, wie z. B. Apps mit Unterstützung für Falschfahrmeldungen, umgehend zur Verfügung stellen zu können, verwendet `Services` zusätzlich die `HighPriorityData`-Schnittstelle der `Communication`-Komponente.

Gemäß den Anforderungen des APs 6 wurden die durch die Plattform angebotenen REST-Schnittstellen für den Zugriff durch externe Apps, hier insbesondere eine iOS-App, unter Verwendung von Techniken der modellbasierten Softwareentwicklung beschrieben und der zugehörige Code anschließend generiert. Für die Anlage des Webservice wird auf eine domänenspezifische Sprache (DSL) zur Codegenerierung zurückgegriffen, um so eine modellgetriebene Softwareentwicklung zu ermöglichen. In DIGS-SERVICES werden für die Abfragen nötige Beschreibungen, wie Pfade, Parameter bzw. Queries usw. definiert. Die DSL generiert daraus lauffähigen Java-Code, der im Anschluss an das Backend angebunden werden muss.

Bei der Konzeption wurde, soweit vorhanden, auf bestehende Methoden aus dem Backend zurückgegriffen, um konsistentes Verhalten beizubehalten. Die Bolt-On-Strategie<sup>12</sup> bietet hier den erforderlichen Ansatz. Indem die API als separate Komponente an das bestehende Backend (`digs-backend`) angebunden wird, kann das Webfrontend (`digs-frontend`) weiterhin ohne aufwendige Umbauarbeiten genutzt werden.

So können verschiedene Informationen nicht nur über die Cloud-Plattform selbst, sondern auch über die REST-Schnittstelle abgerufen werden. Während die Cloud-Plattform – abhängig vom Benutzer – ein Erstellen, Editieren und Aktualisieren der Daten erlaubt, wird in der REST-Schnittstelle selbst z. Zt. lediglich ein lesender Zugriff gestattet. Es können eine Vielzahl von Informationen abgerufen werden. Dies umfasst neben allgemeinen Parkplatzinformationen wie Name, Beschreibung und Ort (siehe Listing 3) auch Informationen über Stellplätze für PKW und LKW als auch Informationen über die Auslastung über einen vergangenen Tag.

---

<sup>12</sup> Pro RESTful APIs – Design, Build and Integrate with REST, JSON, XML and JAX-RS – Sajay Patni, Apress Verlag 2017

```
data: [{
  "ParkingArea.id": number,
  "ParkingArea.name": string,
  "ParkingArea.description": string,

  "ParkingArea.location.latitude": double,
  "ParkingArea.location.longitude": double
}]
```

**Listing 2:** Beispiel für eine REST-Antwort

Neue Schnittstellen lassen sich so zeitsparend in die Plattform integrieren.

Die Smart-Data-Plattform bietet darüber hinaus DATEX-II-basierte Schnittstellen an. DATEX II<sup>13</sup> ist ein von der Europäischen Kommission definiertes Austauschformat für Verkehrsdaten und anhängige Informationen, bspw. für die Bilanzierung von Parkplätzen. Die technologische Grundlage von DATEX II bildet SOAP, welches wiederum XML zur Definition von Übertragungsstrukturen nutzt. Typische Clients für die Abfrage von DATEX-II-Daten sind Verkehrsdatenmarktplätze wie der „Mobilitäts Daten Marktplatz“<sup>14</sup> (MDM) der BAST. Die Plattform implementiert das allgemeine DATEX-II-Profil für Parkplatzdaten, dessen Struktur ausschnittsweise in Abbildung 78 gezeigt ist.

Auf Basis der bereits umgesetzten allgemeinen DATEX-II-Schnittstellen arbeitet die FH Dortmund derzeit an der Integration des vom MDM zur Verfügung gestellten DATEX-II-Profiles für das „Intelligente LKW-Parken“<sup>15</sup> (ITP-Profil). Nach Fertigstellung der Arbeiten an der DATEX-II-Implementierung plant die Fachhochschule gemeinsam mit der Wilhelm Schröder GmbH Tests zum Export von Datensätzen in das MDM-Portal. Durch die Realisierung der Anbindung der Plattform an den MDM erhält die Wilhelm Schröder GmbH beim späteren Betrieb die Möglichkeit, weitere Geschäftsmodelle auf Basis des Angebots von Verkehrsdaten, z. B. für Städte und Gemeinden, zu etablieren.

**Zusammenfassung des aktuellen Stands der Services-Komponente:** Die Grammatik und der Parser für die deklarative Beschreibung der REST-Schnittstellen wurde implementiert. Die FH Dortmund hat die Integration des MDM-ITP-Profiles in die Komponente DIGS-PROCESS fertiggestellt.

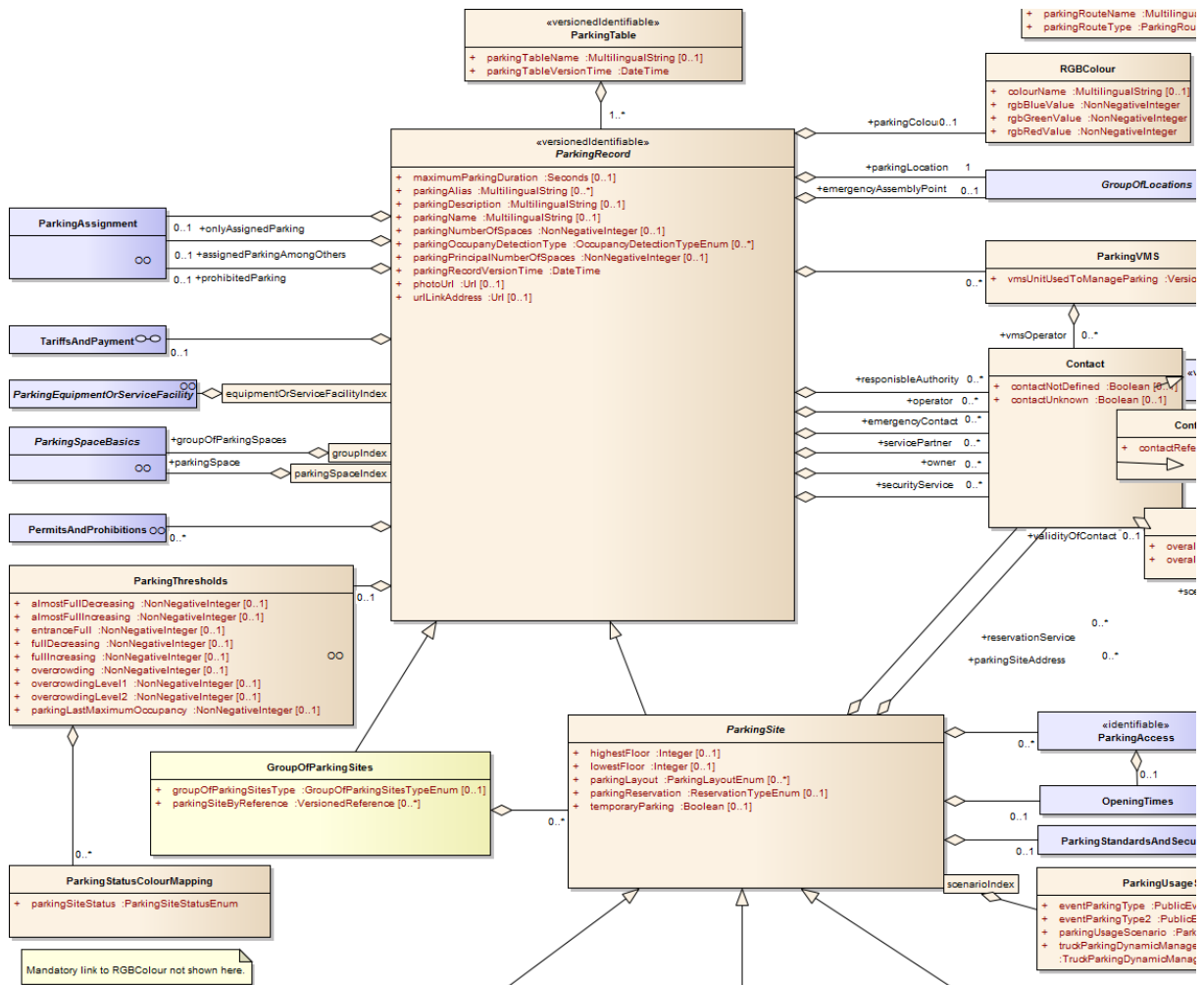
---

<sup>13</sup> <http://www.datex2.eu>

<sup>14</sup> <http://www.mdm-portal.de>

<sup>15</sup> Freudenstein, J. (2015): DATEX II Profil für Intelligentes LKW-Parken (ITP), Version 01-00-00, Oktober 2015, <http://www.mdm-portal.de>





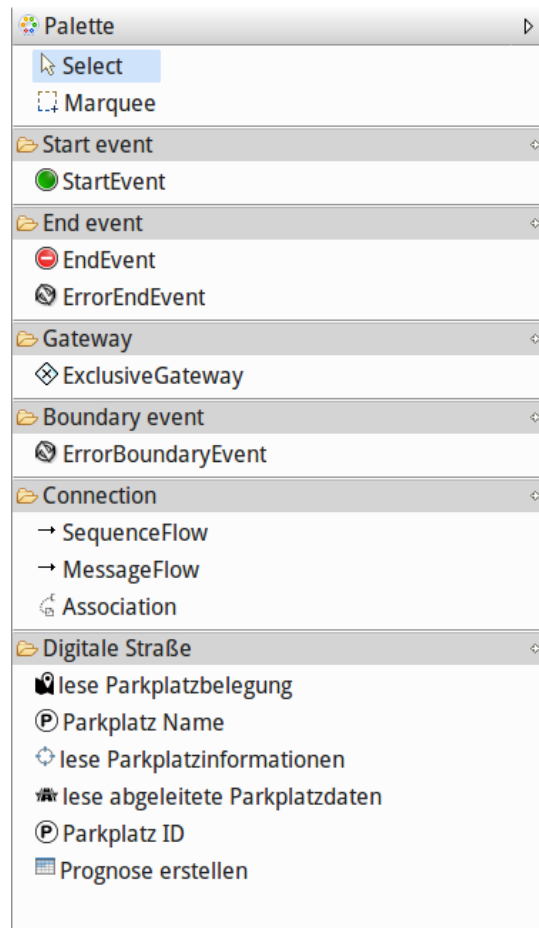
**Abbildung 78:** Ausschnitt der implementierten DATEX-II-Spezifikation für Parkplatzdaten aus dem DATEX II Data Model, Version 2.3 vom 30. September 2014, <http://www.datex2.eu>

### 5.3 DEKLARATIVE DATENVERARBEITUNG

Die Deklarative Datenverarbeitung wurde auf Basis von Geschäftsprozessmodellen (Business Process Model and Notation<sup>16</sup>, BPMN) umgesetzt. Dazu wurde das Activiti Framework<sup>17</sup> zur Modellierung von Geschäftsprozessen verwendet. Das Framework bietet die Grundlagen der BPMN an und kann um eigene Geschäftsprozesse erweitert werden.

<sup>16</sup> <http://www.bpmn.org/>

<sup>17</sup> <https://www.activiti.org/>



**Abbildung 79:** Elemente der Activiti-Geschäftsprozesse für den Einsatz in der Cloudplattform

Hier wurden mehrere Geschäftsprozesse, das heißt logisch miteinander verknüpfte Einzelaufgaben, speziell für den Einsatz mit der Plattform erstellt (siehe Abbildung 79). Diese stehen als ein Projektergebnis als Eclipse-Plugin zur Verfügung. Die Geschäftsprozesse lassen sich durch einen gerichteten Sequenzfluss hintereinander ausführen und verschachteln.

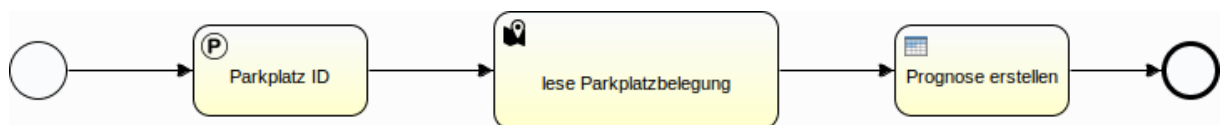
Wie aus Abbildung 79 erkenntlich ist, wurden eigene Geschäftsprozesse für die Digitale Straße entwickelt, welche standardmäßig nicht vorhanden sind. Diese finden sich unter dem Bereich der „Digitalen Straße“. Diese eigenen Elemente sind mit anderen schon existierenden Elementen der Activiti-Geschäftsprozesse kombinierbar.

Mithilfe der Elemente kann ein Geschäftsprozess grafisch über drag&drop erstellt (siehe Abbildung 79) und mit zusätzlichen Eigenschaften versehen werden. Dies geschieht indem ein Nutzer zunächst das StartElement für den Beginn eines neuen Geschäftsprozesses auswählt. Anschließend kann ein einzelnes Element, z.B. Parkplatz ID, verwendet werden. Die ID ist hierbei über die Eigenschaften des Elements editierbar. Die Parkplatz ID wird über den SequenceFlow mit dem Startpunkt verbunden. Nun können weitere Elemente folgen, welche die ParkplatzID wiederum nutzen, z.B. durch das Lesen des Parkplatzes. Schlussendlich entsteht durch das Verbinden der verschiedenen Activiti-Elemente (siehe Tabelle 23) ein kompletter, neuer Geschäftsprozess. Durch die Kapselung kleinster Funktionalitäten können Nutzer ohne Programmierkenntnisse sich diese selbst gemäß den eigenen Anforderungen zusammenstellen. Diese enden immer mit dem EndEvent, um das Ende eines Prozesses zu indizieren. Ein Beispiel hierfür kann in Abbildung 80 betrachtet werden.

Die erstellten Geschäftsprozesse werden an die Plattform übergeben und dort verarbeitet. Dazu greifen die Elemente auf die Daten der Plattform zu und verarbeiten sie.

**Tabelle 23:** Beschreibung der Activiti-Elemente

Event	Beschreibung
Start event	Ist immer der Beginn eines Geschäftsprozesses.
End event	Ist das Ende eines Geschäftsprozesses.
Error end event	Ist das Ende eines Geschäftsprozesses, der im Fehlerfall angesteuert wird.
Exclusive Gateway	Ist eine Verzweigung, um verschiedene Ausführungen anhand von Entscheidungen auszuwählen.
Error boundary event	Ist für eine Fehlermeldung eines Events der Digitalen Straße. Diese wird an das Element angehängen.
Parkplatz Name	Bekommt den Namen eines Parkplatzes übergeben und liefert die dazu passende ID aus der Datenbank.
Lese Parkplatzbelegung	Bekommt als Eingabe eine Parkplatz ID und gibt dazu die aktuelle Belegung des Parkplatzes aus der Datenbank zurück.
Lese Parkplatzinformationen	Eingabeparameter ist die Parkplatz ID, zusätzlich kann ausgewählt werden, welche Informationen des Parkplatzes abgefragt werden sollen (z. B. Ort, Öffnungszeiten, Kapazität usw.). Diese werden dann zurückgegeben.
Lese abgeleitete Parkplatzdaten	Hier wird auch wieder die ID als Eingabe genutzt. Bei der Erstellung des Geschäftsprozesses kann ausgewählt werden, ob man z.B. die Länge von den eingefahrenen PKWs über ein bestimmtes Zeitintervall haben möchte.
Parkplatz ID	Bekommt eine Parkplatz ID als Eingabe und prüft, ob diese existiert. Existiert sie, wird sie weitergegeben.
Prognose erstellen	Mithilfe der Prognose kann ein Median, Mittelwert oder die Summe der Daten berechnet werden für eine bessere Planung.

**Abbildung 80:** Geschäftsprozess für Prognose eines Parkplatzes.

Für die Einbindung von Activiti in Eclipse werden das JDK 7+<sup>18</sup>, Eclipse Neon<sup>19</sup>, Activiti<sup>20</sup> und die spezifischen Erweiterungen zur deklarativen Datenverarbeitung des Projektes benötigt. Hierzu muss zunächst Activiti in Eclipse eingebunden werden. Daraufhin können die Erweiterungen der Cloudplattform in Eclipse Neon installiert werden. Dies geschieht über das Menü Window → Preferences. Dort kann über die User Libraries gesucht werden. Hier ist der Activiti Designer Extensions anzuwählen und über ein externes JAR-File zu installieren. Danach stehen die Funktionalitäten der Cloudplattform Erweiterungen in Eclipse zur Verfügung, sodass diese direkt genutzt werden können.

<sup>18</sup> <http://www.oracle.com/technetwork/java/javase/downloads/index.html>

<sup>19</sup> <http://www.eclipse.org/downloads/packages/eclipse-ide-java-developers/neon1a>

<sup>20</sup> <http://www.activiti.org/download.html>

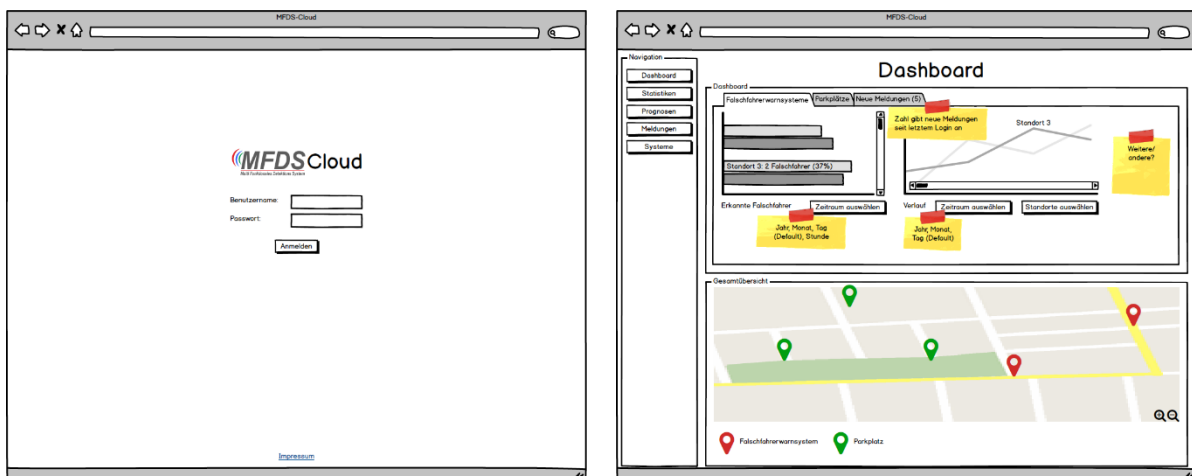
## 5.4 DEMOANWENDUNG (AP9, AP10, AP11)

### FRONTEND-KOMPONENTE

Über die Frontend-Komponente erhält ein Benutzer administrativen Zugriff auf die Plattform. Die grafische Oberfläche wurde entsprechend der Mockups aus dem Zwischenbericht ausgestaltet (siehe Abbildung 81 und Abbildung 82). Die exemplarischen Mockups zeigen dabei eine Anmeldemaske und die Startseite nach der Benutzeranmeldung (Dashboard).

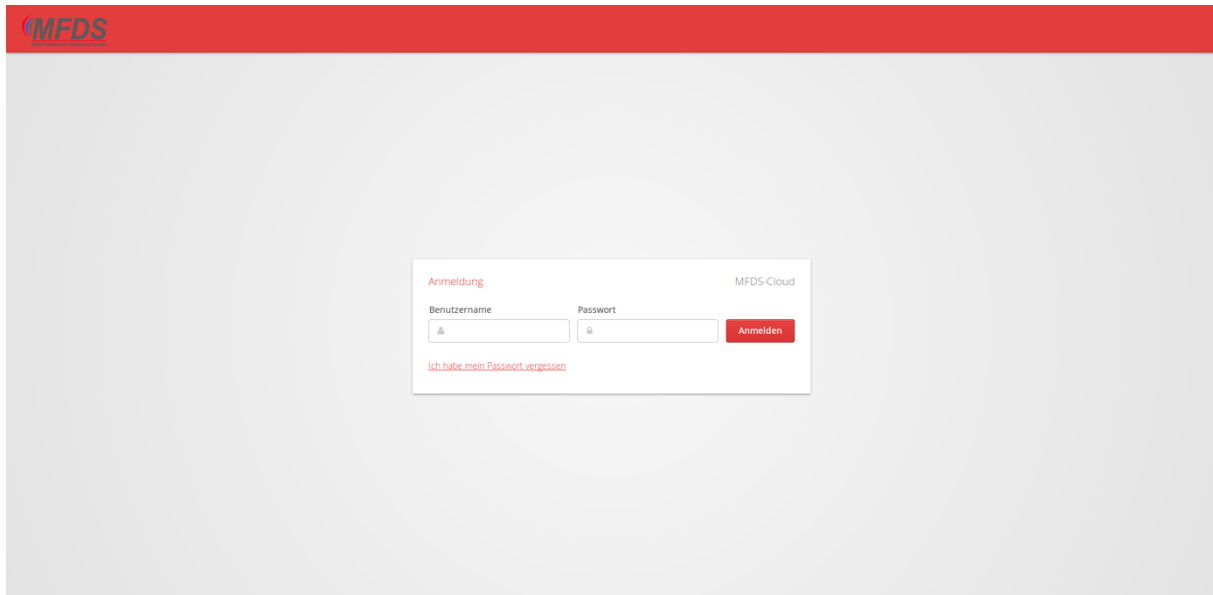
Bei der Umsetzung des Frontend wurde auf das Vaadin Framework gesetzt. Der architektonische Aufbau sieht einen Thin-Client für den Client (Client-Side-Engine) vor, der die in Java deklarativ respektive programmatisch beschriebene Benutzeroberfläche im Browser darstellt. Vaadin benötigt dafür kein Plugin, sondern nutzt stattdessen das Google Web Toolkit (GWT) Framework, um nativen Java-Code in Javascript zu überführen.

Auf der Serverseite setzt Vaadin einen Java Web Server, genauer einen Web Application Container, der das Vaadin Servlet deployed, voraus. Im Projektkontext wird, wie auch für das Backend und andere Servlets, Wildfly in Version 9.0.2 verwendet. Da durch Vaadin komplett auf Java für die Umsetzung der Benutzeroberfläche gesetzt werden kann, können auch die Vorteile von Java, wie die komponentenorientierte Entwicklung, genutzt werden.



**Abbildung 81:** Ausgewählte Mockups (Login und Dashboard) der Administrationsoberfläche der Plattform

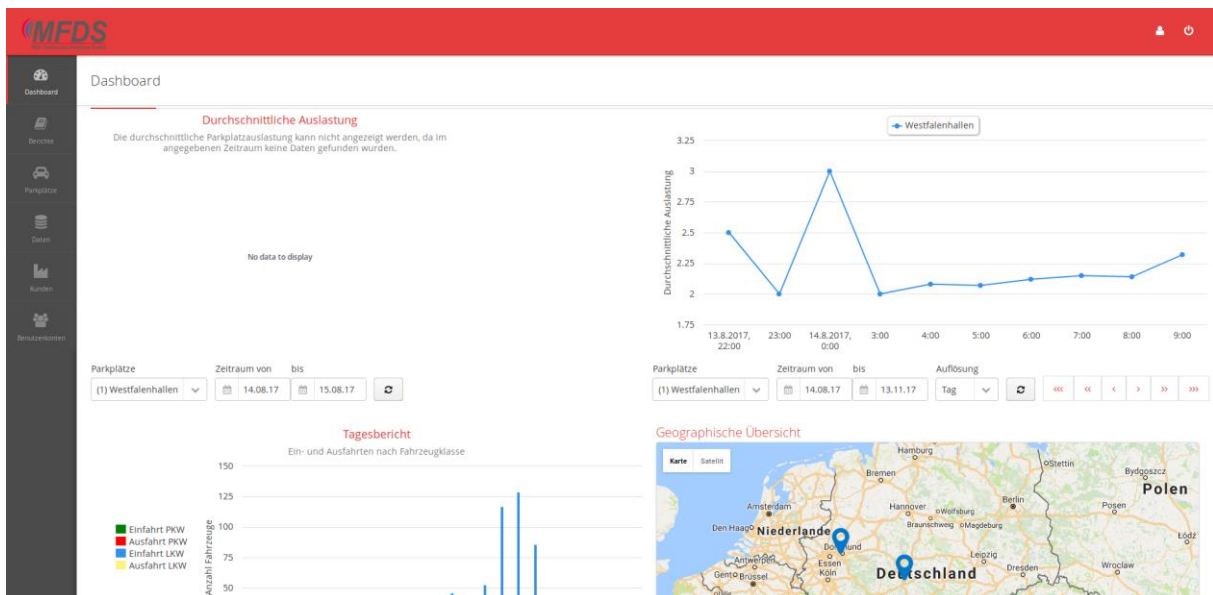
Grundsätzlich lassen sich durch die gewählte technologische Basis in der gleichen Art objektorientiert Komponenten implementieren, sodass technologisch zwischen den einzelnen Komponenten zwar unterschiedliche Frameworks und Paradigmen eingesetzt werden, letztlich jedoch immer auf objektorientierte Java-Programmierung gesetzt werden kann. Somit wurde eine einheitliche technologische Basis für fast alle Teilaufgaben, mit Ausnahme der iOS-Anwendung (da iOS nicht direkt Java unterstützt), der FH Dortmund erreicht.



**Abbildung 82:** Login der umgesetzten grafischen Oberfläche

Bei der Entwicklung wurde auf eine Trennung von Aussehen, Struktur und Logik der Benutzeroberfläche geachtet. Diese Möglichkeit der Trennung wird durch das Model-View-Presenter-Pattern (MVP) in Anspruch genommen. So gehört zu jeder Komponente bzw. jeder View ein Presenter, der die Schnittstelle zu dem Backend beinhaltet, in der das Model definiert wird.

Das Model bildet die Businesslogik bzw. -objekte ab, während die View lediglich für das Rendern der GUI verantwortlich ist. Dadurch kann in dem Presenter übersichtlich die Interaktion zwischen Model und View umgesetzt werden. Der Vorteil dieses Patterns liegt in der einfachen Umsetzung von User Stories.



**Abbildung 83:** Dashboard in konkret umgesetzter Fassung

Vaadin Charts ist eine Bibliothek für Vaadin, die das Erstellen komplexer Diagramme in verschiedenen Darstellungsformen erlaubt. Vaadin wird dabei um eine „Chart“ genannte Komponente erweitert. Im

Projektkontext wird dafür auf Version 3 der Vaadin Charts gesetzt<sup>21</sup>. Beispiele für die Nutzung von Vaadin Charts finden sich in Abbildung 83 sowie Abbildung 88.

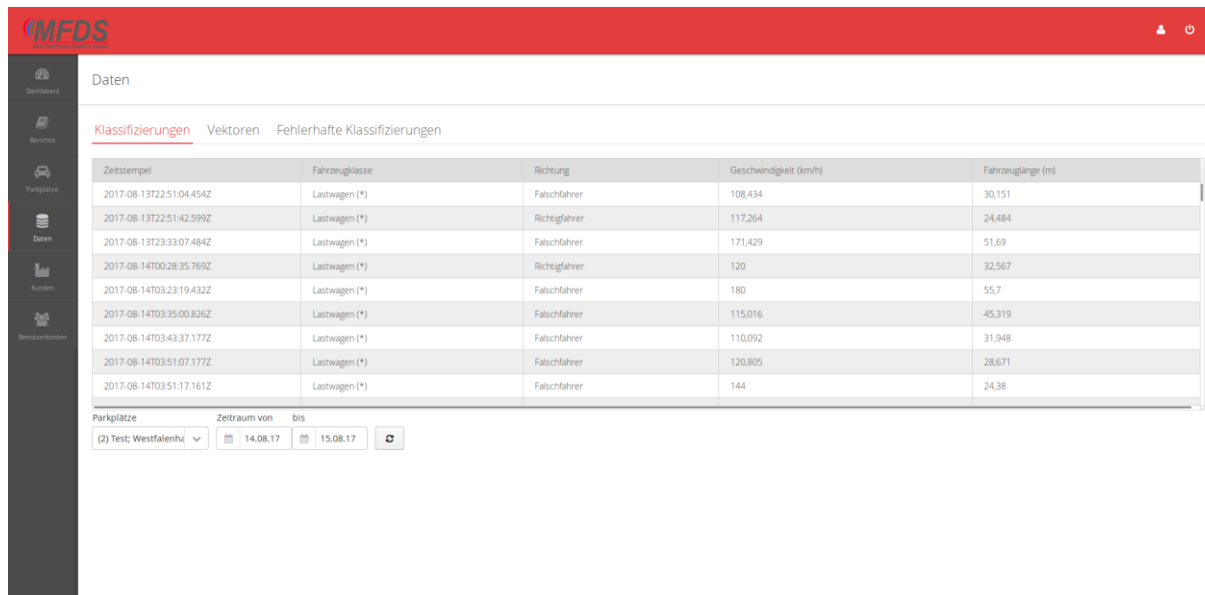
Die Cloudplattform für die Parkplatzbilanzierung ermöglicht die Konfiguration, Verwaltung und Visualisierung der Parkplätze bzw. Messsysteme. Hierbei können die einzelnen Elemente aus dem Datenmodell (siehe Abbildung 77) durch Eingabemasken angelegt, editiert, gelöscht und aktualisiert werden. Auf eine gesonderte Darstellung der Eingabemasken innerhalb der Cloudplattform wurde zwecks einer kompakten Darstellung verzichtet, da alleine die Eingabemasken für die Parkplatzanlage mehrere Bildschirmseiten umfassen. Grundsätzlich handelt es sich bei den zutreffenden Eingaben um Aspekte aus dem Datenmodell, die durch den Nutzer einzupflegen sind. Diese werden nach einer vollständigen Angabe der entsprechend gekennzeichneten Felder auf Konsistenz gemäß der Datenmodellierung (siehe auch Abbildung 77) geprüft und im Falle eines gültigen Eintrags entsprechend persistiert. Die grundsätzlichen Funktionalitäten werden im Folgenden kurz dargestellt.

Nach dem Login ist die erste Ansicht des Benutzers das Dashboard (siehe Abbildung 83). Hier wird eine allgemeine Übersicht über eingerichtete Parkplätze gegeben.

Im oberen Bereich lässt sich die durchschnittliche Auslastung der Parkplätze wie auch deren Verlauf anzeigen. Hier kann außerdem auf die einzelnen Datenpunkte geklickt werden, um mehr Detail-Informationen (z.B. Auflistung der einzelnen Durchfahrten, die zu dem Datenpunkt geführt haben) zu erhalten.

Im unteren Bereich lässt sich die tägliche Auslastung in Form eines Tagesberichtes auslesen. Eine Karte zeigt eingerichtete Parkplätze und Falschfahrerwarnsysteme an.

Die Berichte umfassen verschiedene Ansichten zur Visualisierung erhobener Messdaten. Neben der täglichen Auslastung (Tagesbericht) lassen sich hier auch über einen Zeitraum die durchschnittliche Auslastung sowie mittels einer Heatmap die Lastzeiten des Parkplatzes anzeigen.



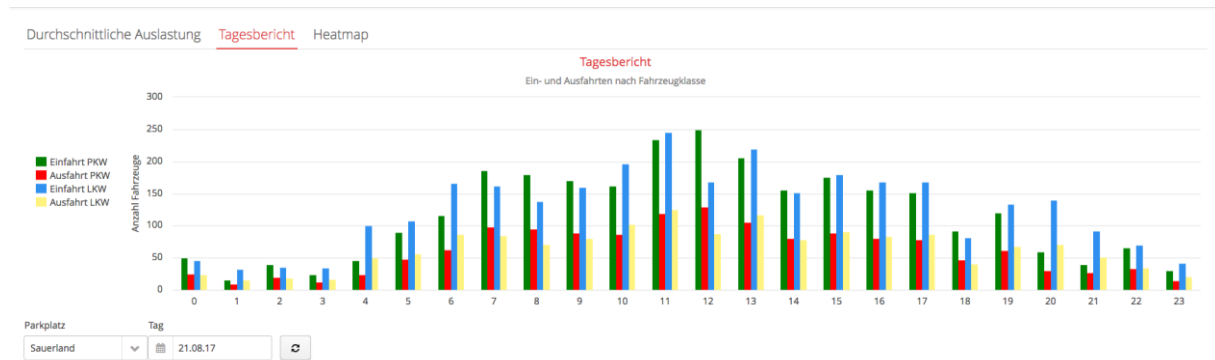
Zeitstempel	Fahrzeugklasse	Richtung	Geschwindigkeit (km/h)	Fahrzeuglänge (m)
2017-08-13T22:51:04.454Z	Lastwagen (*)	Falschfahrer	108,434	30,151
2017-08-13T22:51:42.599Z	Lastwagen (*)	Richtigfahrer	117,264	24,484
2017-08-13T23:33:07.484Z	Lastwagen (*)	Falschfahrer	171,429	51,69
2017-08-14T00:28:35.769Z	Lastwagen (*)	Richtigfahrer	120	32,567
2017-08-14T03:23:19.432Z	Lastwagen (*)	Falschfahrer	180	55,7
2017-08-14T03:35:00.826Z	Lastwagen (*)	Falschfahrer	115,016	45,319
2017-08-14T03:43:37.177Z	Lastwagen (*)	Falschfahrer	110,092	31,948
2017-08-14T03:51:07.177Z	Lastwagen (*)	Falschfahrer	120,805	28,671
2017-08-14T03:51:17.161Z	Lastwagen (*)	Falschfahrer	144	24,38

**Abbildung 84:** Daten können nun in der Cloudplattform angezeigt werden

Der Tagesbericht (siehe Abbildung 85) stellt die stündliche Fluktuation in einem Balkendiagramm dar. Jede Stunde zeigt dabei die aktuelle Auslastung der Fahrzeugklasse an, die farblich getrennt in nebenstehender Legende erläutert werden.

<sup>21</sup> <https://vaadin.com/elements/browse#charts>





**Abbildung 85:** Tagesbericht der grafischen Oberfläche. Es werden die Ein- und Ausfahrten je Stunde dargestellt.

Die durchschnittliche Auslastung (siehe Abbildung 88) hingegen visualisiert mittels eines Liniendiagramms, wie viele Fahrzeuge pro Stunde an einem ausgewählten Tag eintreffen. Wie auch im Tagesbericht, erfolgt eine Unterscheidung anhand der Fahrzeugklassen. Wird der Mauszeiger auf einen Datenpunkt gerichtet, wird über einen Tooltip der genaue Wert angezeigt. So lässt sich eine durchschnittliche Auslastung auf Stundenbasis erkennen.

Die Heatmap (siehe Abbildung 86) gibt einen Überblick über die Parkplatzauslastung von bis zu einer Woche. Dafür sind der gewünschte Zeitraum und die Fahrzeugklasse auszuwählen. In dem anschließend erzeugten Chart wird bei vorliegenden Daten, anhand der Verfärbung die Parkplatzauslastung für eine gewählte Uhrzeit höher oder niedriger dargestellt.



**Abbildung 86:** Heatmap, welche die Auslastung des Parkplatzes darstellen soll.

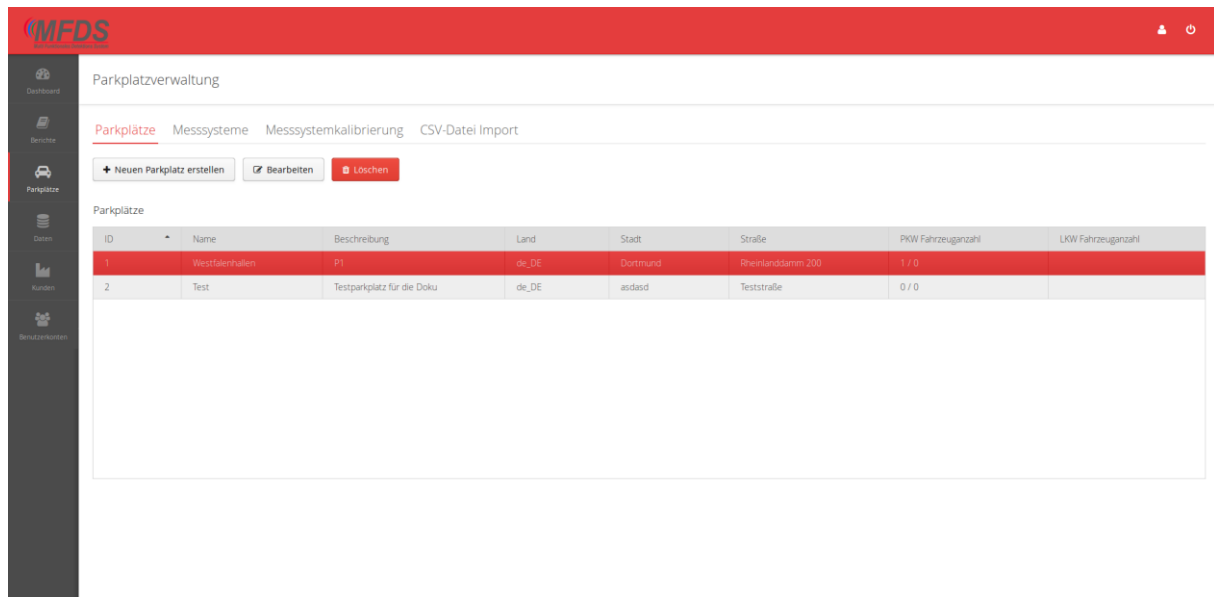


Abbildung 87: Übersicht der angelegten Parkplätze

Unter dem Navigationspunkt Parkplätze befindet sich die Verwaltung für Parkanlagen, Messsysteme und Datensätze. Diese sind über einzelne Reiter analog wie bei den Berichten zu erreichen.

Unter dem Punkt Allgemein werden zunächst grundsätzliche Informationen, wie der Name des Parkplatzes und die Parkplatzzapazität, abgefragt. Auch kann hier eine mögliche Publikations-URL des MDM-Portals konfiguriert werden.

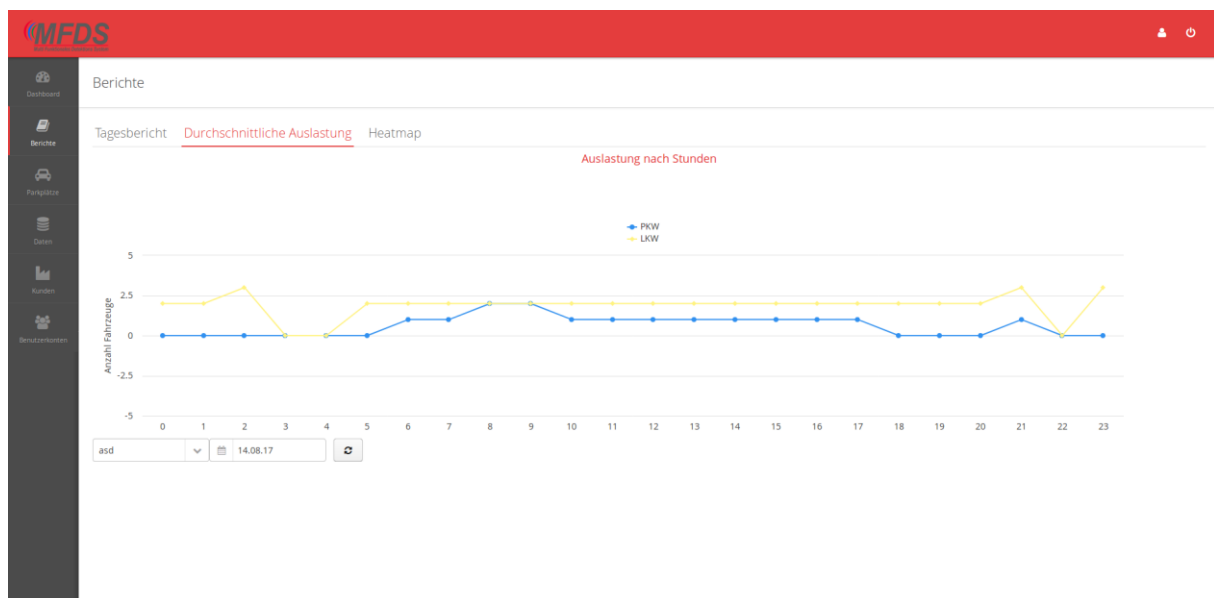


Abbildung 88: Darstellung der durchschnittlichen Auslastung

Es folgt die Zuordnung angelegter Messsysteme für den neuen Parkplatz. Der Abschnitt Ort des Erstellungsprozesses umfasst die Angabe von Geoinformationen. Neben der Adresse des Parkplatzes kann hier auch die Angabe des Breiten- und Längengrades erfolgen, durch einen Klick auf die Karte werden Koordinaten der mit einem Marker markierten Position übernommen. Weiter unten muss eine Zufahrtsstraße für eine korrekte Datex-II-Darstellung angegeben werden.

Danach reiht sich die Festlegung der Öffnungszeiten des Parkplatzes an. Handelt es sich um einen 24/7h Parkplatz, kann der Haken bei "Immer geöffnet" gesetzt werden, ansonsten besteht die Möglichkeit einer individuellen Angabe für jeden Wochentag.

Anschließend muss ein Ansprechpartner/Kontakt bzw. dem Parkplatz zugehörige Person/en eingerichtet werden. Das umfasst sowohl einen Namen, wie auch Telefonnummer und Mail-Adresse, Adresse und Arbeitszeiten. Bei der Eingabe einer Telefonnummer ist auf ein internationales Format (in der Form +49123456789) zu achten.

Abschließend können dem Parkplatz noch Eigenschaften nach DATEX II zugewiesen werden. Dabei werden Ausstattungs-, Beschaffenheits- und Sicherheitsmerkmale des Parkplatzes, die durch vorgegebene Typ-Bezeichnungen festgelegt sind, einem Parkplatz zugeordnet. Diese können optional durch eine Beschreibung ergänzt werden.

Um einen wie zuvor beschrieben angelegten Parkplatz zu bearbeiten oder löschen, muss dieser durch einen Klick auf den entsprechenden Eintrag in der Tabelle ausgewählt werden und anschließend eine Aktion über die obere Buttonleiste selektiert werden.

Analog zur Parkplatzverwaltung erfolgt die neue Anlage eines Messsystems. Neben Beschreibung des Messsystems muss auch die Angabe einer eindeutigen ID erfolgen.

Die Messsystemlänge beschreibt den Abstand der einzelnen Leitpfosten des aufgebauten Messsystems in der Einheit Meter. Fehlende Kunden können unter dem entsprechenden Menüpunkt angelegt und verwaltet werden.

Für die Messkonfiguration ist auch wichtig, wie erfasste Fahrrichtungen gezählt werden sollen. Ändert sich im Bauprozess eine zuvor geplante Einfahrt zu einer Ausfahrt, kann das entsprechend konfiguriert werden, ohne die Detektoren aufwendig umzusetzen.

Die Messsystemkalibrierung erlaubt eine automatisierte Kalibrierung eines ausgewählten Messsystems auf festgelegte Werte. Diese kann einmalig oder wiederholt erfolgen. Für das Anlegen, Löschen und Bearbeiten ist analog zu der Parkplatzverwaltung vorzugehen.

Bei der Anlage einer Messsystemkalibrierung wird für jede Fahrzeugklasse ein Kalibrierungswert festgelegt. Bei der Planung ist der Zeitpunkt der Kalibrierung einzustellen. Hierbei ist es auch möglich eine Wiederholungssequenz auszuwählen (z.B. wöchentlich). Bei Wiederholungen erfolgt die erste Kalibrierung nach dem ersten möglichen Zeitpunkt des eingestellten Startdatums.

Über den CSV-Datei Import kann ein Datensatz in das System eingelesen werden. Dazu wird der gewünschte Parkplatz und das Messsystem ausgewählt, welchem die Daten zugeordnet werden. Anschließend wird eine CSV-Datei mit Vektoren im Rohformat hochgeladen. Dies kann je nach Größe einen Moment dauern. Der Fortschritt wird durch einen kleinen roten Balken unterhalb des Uploadmoduls angezeigt.

Zuletzt wird der Import der Daten über die Schaltfläche "Importieren" gestartet. Während dieser Dauer sollte die Seite nicht verlassen werden, um den Import-Vorgang nicht abubrechen. Der Fortschritt wird über einen weißen Balken am oberen Rand angezeigt. Erst wenn dieser nicht mehr zu sehen ist, wird durch die Meldung "Import erfolgreich" ein neuer Importvorgang möglich. Die Seite kann dann auch wieder ohne Datenverlust verlassen werden.

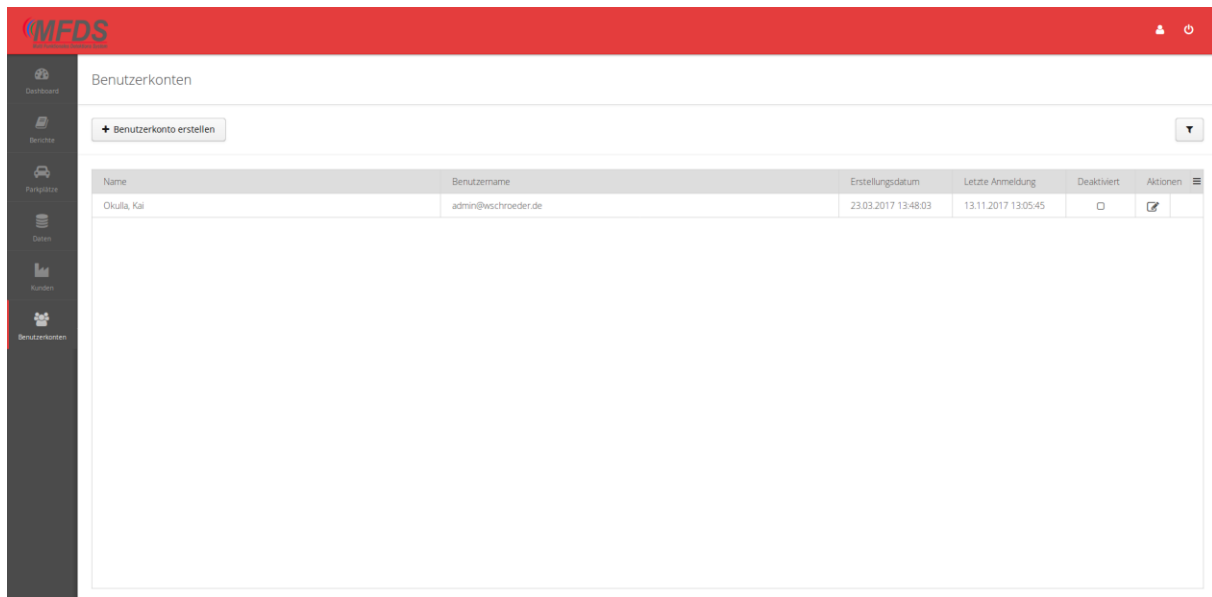
Der Navigationspunkt Daten kann nur von Nutzern mit Administrationsrechten eingesehen werden und teilt sich in drei Tabs auf: Klassifizierungen, Vektoren und fehlerhafte Klassifizierungen. In allen Fällen kann der Datenbestand in Rohform – so wie der ursprüngliche Vektor eingegangen ist - über einen Zeitraum und Parkplätze abgefragt werden.

Die Klassifizierungen beinhalten dabei ausschließlich gültige Vektoren (d.h. keine fehlerhaften oder Vektoren, welche zu keinem Messsystem gehören). Der Tab Vektoren liefert die Rohform aus dem Messsystem. Unter dem Tab Fehlerhafte Klassifizierungen werden fehlerhafte oder falsche Informationen angezeigt (z.B. andere Zeichenketten, unvollständige Vektoren etc.). Letztere entstehen bei-

spielsweise bei dem Import fehlerhafter Vektorzeichenketten, die durch Nutzerimporte (z.B. andere Dateien) oder Übertragungsfehler entstanden sein können.

In der View unter dem Tab Kunden können Kunden mit Einschränkungen verwaltet, das heißt, neu angelegt und bearbeitet werden. Eine Löschung der Kunden kann hier aus technischen Gründen nicht erfolgen. Der Navigationspunkt kann nur von Nutzern mit Administrationsrechten angesteuert werden.

Die Verwaltung der Userprofile (siehe Abbildung 89) erfolgt analog zu denen der Kunden. Hier können angelegte Benutzerkonten auch direkt gelöscht werden. Bei der Anlage eines Users ist die Rollenvergabe zu berücksichtigen, die maßgeblich über Sichtbarkeit respektive Zugriffsrechte der Daten-, Kunden- und Userprofilview entscheidet.



The screenshot shows the 'Benutzerkonten' (User Accounts) management interface. It features a red header with the MFDS logo and a dark sidebar with navigation icons. The main content area has a '+ Benutzerkonto erstellen' button and a table with the following data:



Name	Benutzername	Erstellungsdatum	Letzte Anmeldung	Deaktiviert	Aktionen
Okulla, Kai	admin@wschroeder.de	23.03.2017 13:48:03	13.11.2017 13:05:45	<input type="checkbox"/>	 

Abbildung 89: Benutzerkontenverwaltung

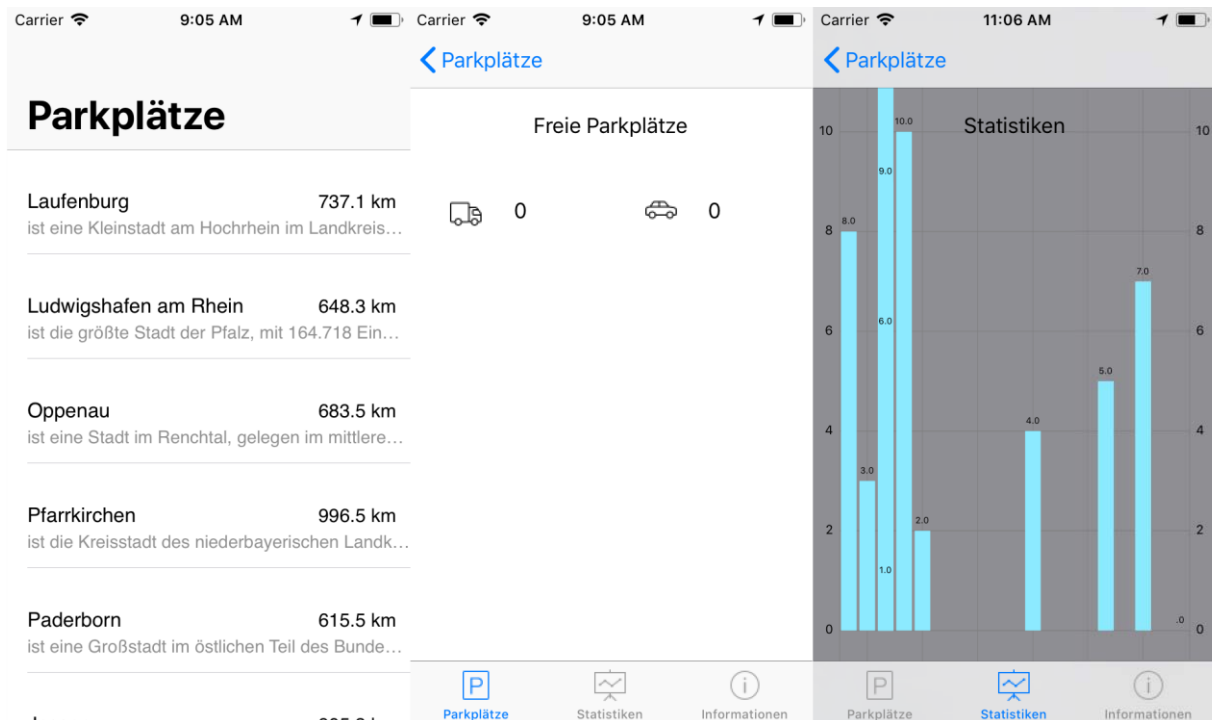
**Zusammenfassung des aktuellen Stands der Frontend-Komponente:** Die Mockups der Administrationsoberfläche wurden durch konkrete Implementierungen ersetzt.

#### DIGS-IOS-APP

Für die umgesetzte Cloudplattform ist von der FH Dortmund eine Anwendung für mobile iOS-Geräte entwickelt worden.

Die mobile Anwendung ist in der Lage, Parkplätze in der Nähe des momentanen Nutzers inkl. einer kurzen Beschreibung anzuzeigen (siehe Abbildung 90). Dies stellt die Ansicht dar, welche ein Nutzer direkt nach dem Starten der Anwendung zu sehen bekommt. Bei dieser Ansicht werden die Parkplätze mit Namen und Beschreibung sowie ihrer ungefähren Entfernung dargestellt.

Bei der Auswahl des Parkplatzes wird in die Ansicht des Parkplatzes gewechselt und die Anzahl an freien Stellplätzen wird angezeigt. Dies wurde für PKW und LKW umgesetzt. Zusätzlich können die jeweiligen Belegungen nach Stundenbasis im Statistik-Bereich abgerufen werden. Um die spezifischen Möglichkeiten von iOS zu nutzen, wurde die Einstellung für die Anwendung analog zu anderen iOS Anwendungen realisiert, sodass diese über die Einstellungs-App erreicht werden (siehe Abbildung 91). Hier ist es möglich auszuwählen, ob man nur LKW-Stellplätze angezeigt bekommen möchte. Dies könnte eine Hilfe für LKW-Fahrer darstellen.



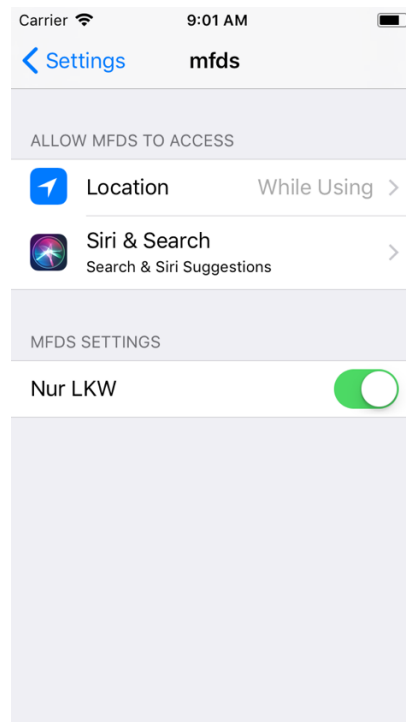
**Abbildung 90:** Anzeigen der iOS-Anwendung für die Startansicht, eine Parkplatzbilanzierung und eine Statistik-Ansicht für den Tagesbericht.

Technisch wurde die mobile Anwendung für iOS direkt mit Swift für iOS umgesetzt, um eine möglichst große Vielzahl an Funktionen des Betriebssystems, wie die Einbindung der systemspezifischen App-Einstellungen, direkt nutzen zu können. Im Laufe der Entwicklung wurde jedoch die mobile Anwendung primär als Anzeigefunktionalität für eine REST-Schnittstelle verwendet, sodass grundsätzlich für eine weitere Entwicklung zu evaluieren wäre, ob nicht auch eine weitere Entwicklung als CROSS-Plattform Anwendung z. B. durch Cordova<sup>22</sup> in Betracht kommen könnte. Dies hätte den Vorteil, dass die Codebasis sowohl für Android- als auch iOS-Geräte genutzt werden kann. Informationen, welche aus dem mobilen Gerät selbst genutzt werden müssen, beziehen sich lediglich auf rudimentäre Angaben wie den aktuellen Standort, welcher durch moderne Webstandards<sup>23</sup> bereits abfragbar ist.

**Zusammenfassung des aktuellen Stands der iOS-App:** Die FH Dortmund hat eine iOS App umgesetzt, welche grundlegende Funktionalitäten zum Betrachten von Parkplatzbilanzierungen ermöglicht.

<sup>22</sup> <https://cordova.apache.org/>

<sup>23</sup> <https://www.w3.org/2008/geolocation/>



**Abbildung 91:** Einstellungen für die Anwendung, sodass nur für LKW relevante Daten angezeigt werden.

## 5.5 PROJEKTDOKUMENTATION (AP11)

Zum Zwecke der Projektdokumentation wurden diverse Dokumentationsdokumente und Einrichtungs-Anleitungen angefertigt. Um das erstmalige Einrichten der Cloudplattform (siehe auch Abschnitt 5.4) auf einem neuen Gerät weitgehend zu vereinfachen, wurde eine Installationsroutine geschrieben, welche die einzelnen Teile (Git Repositories) automatisch downloadet und das Softwareprojekt kompiliert. Damit die Installationsroutine erfolgreich ausgeführt werden kann, sind diverse Vorabininstallationen und Konfigurationen erforderlich, welche in einem separaten Dokument zu Anleitungszwecken vorgehalten werden. So sind neben einer vorherigen Installation von diversen Tools auch eine spezielle Konfiguration des MySQL-Modus, die Installation spezieller Abhängigkeiten und die Konfiguration eines Applikationsservers erforderlich. Dies wird in einer Dokumentation zur Einrichtung der Entwicklungsumgebung im Detail dargelegt.

Weitere Dokumentationen erklären die Einrichtung und Nutzung der Erweiterungen der Cloudplattform, welche eine deklarative Datenverarbeitung (siehe auch Abschnitt 5.3) direkt in Eclipse erlauben. Des Weiteren wurden die grafische Oberfläche (siehe auch Abschnitt 5.4) und elementare Bestandteile der Applikationslogik entweder in den entsprechenden Implementierungen oder zusätzlichen Dokumenten weitergehend beschrieben.

**Zusammenfassung des aktuellen Stands der Projektdokumentation:** Die FH Dortmund hat wesentliche Aspekte ihrer Arbeit entweder standardkonform realisiert oder hat für die Einrichtung von diversen Aspekten Anleitungskarten geschrieben, welche eine Verwertung der Projektergebnisse auch über den Projektzeitraum hinaus ermöglichen.



## 6 AKTUALISIERUNG DES MARKTEINFÜHRUNGSKONZEPTE

**Verantwortlicher Partner:** Wilhelm Schröder GmbH

Im Folgenden wird auf das bereits vorhandene Markteinführungskonzept eingegangen. Es wird auf den Sachstand des Konzepts eingegangen mit den bereits erfolgten Schritten. Zudem werden Ergänzungen hinzugefügt, die im Verlauf des gesamten F&E-Projekts entwickelt wurden.

### 6.1 ANGEZIELTE MÄRKTE UND ANGESTREBTE MARKTANTEILE

Aufgrund der zahlreichen Einsatzmöglichkeiten lassen sich verschiedene Teilmärkte für Verkehrstelematik identifizieren, die die Gesamtinfrastruktur des Projektes bedienen kann. Diese sind unverändert zum ursprünglichen Markteinführungskonzept des Projektantrags, ergänzt durch den nicht unwesentlichen Markt der urbanen Parkraumbewirtschaftung und gewerblichen Parkflächen.

Marktsegment	Mögliche Kunden
<b>Urbane Parkraumbewirtschaftung, gewerbliche Intra-Logistik</b>	Kommunen, Veranstaltungsgelände, Stadien, Privatwirtschaft
LKW-Parkplatzbilanzierung (an Autobahnen)	Bund und Länder, Raststätten und Tankstellenbetreiber (auch der Autohöfe)
Falschfahrerwarnung an Autobahnen	Bundesrepublik Deutschland
Stauerkennung und Verkehrsflussüberwachung (mobil und stationär)	Bundesrepublik Deutschland und die Bundesländer
Verkehrszählung und -klassifizierung	Bundesrepublik Deutschland und die Bundesländer, Verkehrsplanungsbüros
Verkehrsflussüberwachung in und vor Baustellen (mobil)	Bundesrepublik Deutschland und die Bundesländer
Urbane Parkraumbewirtschaftung, gewerbliche Intra-Logistik	Städte und Gemeinden, private Parkplatz- und Parkhausbetreiber, Privatwirtschaft

**Da in den Bereichen Parken und Falschfahrerwarnung die ersten Produkte abgeleitet werden, ist zu diesen Punkten eine detailliertere Analyse der Märkte erfolgt.**

#### Gewerblicher Anwendungsmarkt und Chancenbewertung

**IST-ANALYSE:** Im Rahmen der gewerblichen Nutzung kann das System zur Bilanzierung von Parkplätzen im öffentlichen Raum und zur gewerblichen Nutzung eingesetzt werden. Dazu werden die auf den Parkplatz ein- und ausfahrenden Fahrzeuge detektiert und mit den vorhandenen Parkflächen verrechnet, um den Status-quo der Parkplatzbelegung zu ermitteln. Die Detektion erfolgt dabei nach der Klassifizierung von LKW und PKW. Die Parkplatzbilanz kann beispielsweise durch eine Smartphone-Applikation visualisiert werden und so das Parkraummanagement in Controlling- und Logistikprozessen unterstützen.

#### Analyse der gewerblichen Anwendung

Die Smartphone- und Web-Applikationen der Parkplatzbilanzierung ermöglichen es *live* bzw. On-Demand Daten zur Parkplatzbelegung oder zur Statistikauswertung zu erhalten. So kann bei Großveranstaltungen und Events der Verkehr koordiniert oder Unternehmen in ihrer Logistik unterstützt werden. Aufgrund der einfachen Installation und geringer Kosten bestehen vielfältige Möglichkeiten das System auch im gewerblichen Bereich zu nutzen.

Ebenso wurden großen Musikveranstaltungen und Festivals als Einsatzorte für das System identifiziert, auch weil diese Veranstaltungsorte nicht immer auf die temporär hohen Verkehrsaufkommen ausgelegt sind. Während dieser Events entsteht für eine kurze Zeitspanne ein großer logistischer

Aufwand, um Ausrüstung sowie eine große Menge von Personen, die per Auto oder Bus anreisen, innerhalb weniger Tage schnell und sinnvoll zu lenken. Das System kann diese Events unterstützen, indem es alternative Routing-Lösungen für den Verkehr sowie Parkplatzinformationen für Teilnehmer für die Veranstaltung bereitstellt.

Im Allgemeinen stellen alle Unternehmen mit großen Parkflächen oder Logistikkunden potenzielle Kunden dar, siehe Tabelle 24<sup>24</sup> und Tabelle 26 für diejenigen, die bisher identifiziert wurden. Viele explizite Einsatzmöglichkeiten, insbesondere in den Logistikzentren der relevanten großen Dienstleister, haben sich als schwierig zu messen erwiesen, könnten aber die Anzahl potenzieller Standorte deutlich erhöhen.

**Tabelle 24:** Marktpotenzial Deutschland

Potenzielle Kunden	Anz. Einsatzorte	Anz. Mess-Systeme	Summe Systeme
Stadien (Fußball Kapa. >15.000)	114	5	570
Eishallen /-stadien (>4000)	33	2	66
Zusätzl. Große Mehrzweck- u. Eventhallen	>30	1	30
Freizeitparks	113	3	339
Messegelände	25	5	125
Outlet-Center	99	2	198
Staatliche und staatl. Anerkannte Hochschulen	427	1	427
Einzelhandel; unterstützung bei der Parkplatzverwaltung (exemplarisch)	IKEA (D) 51 OBI (D) 330 Hellweg 90 Metro 107 ...	2 2 2 2	102 660 180 214
Logistikdienstleister, unterstützung bei unternehmensinternen Logistikaufgaben (exemplarisch)	DB Mobility Logistics AG, Deutsche Post DHL Dachser GmbH & Co. KG (>430 Standorte weltweit), Hermes Europe, Geopost, Kühne + Nagel KG, Rhenus AG & Co. KG, Volkswagen Konzernlogistik, UPS Europe, Hellmann Worldwide Logistics...	Nicht messbar	
Weitere Einzelhändler und Logistikbetreiber	Nicht messbar		
Flughäfen mit >1Mio Passagiere / Jahr in D	17	3	214
<b>Gesamt</b>			<b>3125</b>

Durch die einfache Installation der vielfältigen Einsatzmöglichkeiten und der kostengünstigen Implementierung wird die Anschaffungsquote in dem Bereich der Massenveranstaltung und Logistik bei 30%, in der Worst Case-Kalkulation bei 10 % und im Best Case bei 50% geschätzt. Der Systempreis der einfachsten Variante wird aktuell auf 8.500€ kalkuliert, jedoch sind Erweiterungen auf mehrere Fahrspuren oder LED-Anzeigen wahrscheinlich, daher wird mit einem Durchschnittspreis von 10.000€ pro Messsystem kalkuliert.

**Tabelle 25:** Marktüberblick Deutschland

	Prozent	Anzahl Systeme	Umsatz (Kosten Messsystem 10.000 €)
Gesamtaberschätzung	100%	3.125	31.125.000,00 €
Best Case Anteils-Abschätzung	50%	1.563	15.650.000,00 €
<b>Konservative Anteils-Abschätzung</b>	<b>30%</b>	<b>938</b>	<b>9.380.000,00 €</b>
Worst Case Anteils-Abschätzung	10%	313	3.130.000,00 €

Um vom deutschen Markt auf die gesamte EU zu schließen, ist die Anzahl der Fußball-Stadien mit den dazugehörigen Parkflächen eine gute Größe zur Darstellung der Skalierbarkeit. In Europa gibt es 3.304 Stadien mit einer Kapazität von mehreren tausend Sitzplätzen. Entsprechende Parkflächen sind daher Voraussetzung. Weitere mögliche Installationsorte wie Freizeitparks, Flughäfen und Messegelände wurden ebenso für Europa ermittelt, dabei sind nur relevante Größen der Lokalitäten in die Berechnung miteinbezogen worden.

Die unterschiedlichen Märkte der EU sind aufgrund der differenzierten Voraussetzungen und Umstände jeweils durch eine gesonderte Vermarktungsstrategie anzusprechen und aufgrund der Vielfältigkeit

<sup>24</sup> Quellen, ermittelt 10.2017 : [https://www.stadionwelt.de/sw\\_stadien/index.php?folder=sites&site=ligen&land=Deutschland](https://www.stadionwelt.de/sw_stadien/index.php?folder=sites&site=ligen&land=Deutschland),  
[https://www.stadionwelt.de/sw\\_stadien/index.php?folder=sites&site=ligen&land=Deutschland](https://www.stadionwelt.de/sw_stadien/index.php?folder=sites&site=ligen&land=Deutschland),  
<https://www.themenpark.de/freizeitparks/in/deutschland>,  
<http://www.auma.de/de/messemarkt/branchenkennzahlen/internationalemessen/seiten/hallenkapazitaeten.aspx>,  
<http://www.outletcenter-deutschland.de/>, <http://univ.cc/search.php?dom=de&key=&start=1>,  
<https://www.hochschulkompass.de/home.html>, [https://wikitravel.org/de/Liste\\_der\\_Verkehrsflugh%C3%A4fen\\_in\\_Deutschland](https://wikitravel.org/de/Liste_der_Verkehrsflugh%C3%A4fen_in_Deutschland)

noch nicht im vollen Umfang abzuschätzen. Alle Kommerzialisierungs- und Finanzpläne müssen individuell strategisch ausgelegt und angepasst werden, so dass jeder Markt berücksichtigt und die weitere Strategie auf seine individuellen Vorzüge ausgerichtet wird. Die folgenden Angaben für den europäischen Markt in **Tabelle 26**<sup>25</sup> können daher nur das enorme Potenzial des Systems im Bereich „Smart City Parks“ aufzeigen und keine abschließende Gesamtübersicht geben.

**Tabelle 26:** Marktpotenzial EU (ohne Deutschland)

Potenzielle Kunden	Anz. Einsatzorte	Anz. Mess-Systeme	Summe Systeme	
Stadien (Fußball Kapa. >15.000)		429	5	2145
Stadien (Fußball Kapa. >2.000)		1159	1	1159
Freizeitparks		305	3	915
Messegelände >100.000qm		42	5	210
Outlet-Center		>20	5	100
Staatliche und staatl. Anerkannte Hochschulen		1042	2	2084
Einzelhandel; Unterstützung bei der Parkplatzverwaltung (exemplarisch)	IKEA 66 (weltweit >400) zahlreiche weitere		2	132
Weitere Einzelhändler und Logistikbetreiber	Nicht messbar			
Flughäfen 30 Größte in EU		30	5	570
zusätzl. Flughäfen mit >1Mio Passagiere / Jahr in EU		137	2	274
<b>Gesamt</b>				<b>7589</b>

**Tabelle 27:** Marktüberblick EU (ohne Deutschland)

	Prozent	Anzahl Systeme	Umsatz (Kosten Messsystem 10.000 €)
Gesamtschätzung	100%	7.589	75.890.000,00 €
Best Case Anteils-Abschätzung	50%	3.795	37.950.000,00 €
<b>Konservative Anteils-Abschätzung</b>	<b>30%</b>	<b>2.277</b>	<b>22.770.000,00 €</b>
Worst Case Anteils-Abschätzung	10%	759	7.590.000,00 €

### Öffentlicher Anwendungsmarkt Autobahn und Parkplatz und dessen Chancenbewertung

Ist-Analyse: Im Rahmen der öffentlichen Nutzung kann das System zur Bilanzierung von Parkplätzen an Autobahnen und mehrspurigen Straßen, sowie zur Detektion von Falschfahrern eingesetzt werden. Das Problem überfüllter Parkplätzen ist in ganz Europa, speziell für LKW-Fahrer akut. Eine entsprechende Darstellung der freien Parkflächen durch das MFDS kann die Auslastung der vorhandenen Flächen optimieren und so Gefahrensituationen überfüllter Parkplätze (speziell an den Parkplatzeinfahrten) vermindern. Die Detektion von Falschfahrern und deren Warnung an der Straße mit Alarmierung des fließenden Verkehrs im Gefahrenbereich soll Unfälle vermeiden, die meist mit schweren oder sogar tödlichen Folgen enden. Die Informationsbereitstellung beider Szenarien kann beispielsweise durch eine Smartphone-Applikation visualisiert werden oder über die gewünschten Kanäle der Kunden erfolgen.

Als Kunden des Systems kommen hier in erster Linie die Regierungen der einzelnen EU-Länder infrage, da die Autobahnen in Zuständigkeit der Bundes- oder Länderpolitik liegen.

<sup>25</sup> Quellen, ermittelt 10.2017 : <http://www.stadiumguide.com/>, <http://www.worldstadiums.com/>, <http://fussballtempel.net/>, <http://www.freizeitparkfun.de/dieparks.htm>, <https://www.fewo-direkt.de/info/unterkunft-buchen/spezialverzeichnisse/familienurlaub/freizeitparks-europa>, <https://www.travelbook.de/attraktionen/freizeitparks/die-beliebtesten-freizeitparks-in-europa-und-deutschland>, <https://www.tripadvisor.com/TravelersChoice-Attractions-cAmusementParks-g4>, <https://www.europeanbestdestinations.com/top/best-amusement-parks-in-eu-rope/>, <http://www.expodatabase.de/wichtige-messeplaetze-europa/>, <https://www.handelsdaten.de/factory-outlet-center/ranking-der-erfolgreichsten-factory-outlet-center-europa-2>, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/285449/umfrage/filialen-von-ikea-we-ltweit-by-countries-2013/>, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/157929/umfrage/groesste-flughafen-europas-nach-anzahl-der-passagiere/>, <http://www.airport-data.com/world-airports/countries/>, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/157929/umfrage/groesste-flughafen-euro-pas-to-number-of-passengers>

### Analyse der öffentlichen Autobahn und Parkplatz-Anwendung

Die Installationsorte des Systems an der Autobahn wurden im Folgenden zunächst für Deutschland zusammengestellt<sup>26</sup>. Dabei wird der multifunktionale Nutzen des Systems erkennbar, da an Autobahnparkplätzen ein System für Parkplatzbilanzierung und Falschfahrerdetektion verwendet werden kann. Diese Synergie ist als einer der großen Vorteile des Systems zu sehen.

**Tabelle 28:** Anzahl Einsatzmöglichkeiten der Falschfahrerwarnsysteme in Deutschland

Autobahnkilometer	<b>12.900</b>		
Anschlussstellen	<b>2.705</b>		
	Anzahl Anschlussstellen	Anzahl Systeme	Messsysteme gesamt
Ausfahrten	2211	2	4422
Dreiecke	94	4	376
Kreuze	120	8	960
Falschfahrersysteme an der Autobahn (ohne Parkplätze)			5758

Tabelle 28 zeigt die Anzahl potenzieller Installationsorte des Falschfahrerwarnsystems in Deutschland, Tabelle 29 führt ergänzend die Parkplätze an Autobahnen mit der Anzahl der Messsysteme auf.

**Tabelle 29:** Anzahl Einsatzmöglichkeiten MFDS Highway Parking Systeme in Deutsch-

Parkplätze	2177		
	Anzahl Installationsorte	Anzahl Systeme	Messsysteme gesamt
Parkplätze ohne WC	899	2	1798
Parkplätze mit WC	690	2	1380
Raststätten	550	3	1650
Autohöfe	38	2	76
davon kombinierte Systeme Parking und Falschfahrerwarnung an den Parkplätze Einfahrten			2139
Messsysteme an Parkplätzen			4904

Die Werte für die Bundesrepublik Deutschland sind dabei auf andere Länder der EU zu übertragen. Weitreichende Recherchen hierzu sind bereits in einer gesonderten Machbarkeitsanalyse durchgeführt worden.

### Betrieb und Service

Ein weiterer Markt ergibt sich für das System generell durch den Bereich Betrieb und Service der Systeme im Sektor der Dienstleistungen. Permanente Kosten fallen durch die Energieversorgung an (falls permanente Energieversorgung des Netzes genutzt wird). Dieses liegt auf Seiten des Kunden. Die Weiterleitung der Daten durch das entsprechende Kommunikationsnetz (z.B. per Mobilfunk), sowie der Betrieb des Web-Portals (Zugriff auf die Daten und Schnittstellen) wird von der Fa. Wilhelm Schröder und den gegebenen Partnern übernommen. Dies ist ggf. an die speziellen Anforderungen der einzelnen EU-Länder oder Kunden anzupassen. Variablen sind hierfür Kommunikationstarife, gesetzl. Vorgaben oder Anzahl Systeme pro Kunden (Mengenrabatt). Daher wird dieser Teil individuell pro Kunde kalkuliert.

### Angestrebte Marktanteile

Nach Überführung der prototypischen Sensorik in ein erstes Produkt wird zunächst die Einführung des innovativen Sensorsystems an 15-25 Installationsorten in 2018 anvisiert. Dies erscheint realistisch, da bereits zu 3 potenziellen Kunden im Bereich „Gewerblicher Anwendungsmarkt Parken“ Kontakt geknüpft wurde.

<sup>26</sup> Quellen, ermittelt 10.2017: <http://www.autobahnatlas-online.de/>

Die Anzahl der Installationen soll im folgenden Jahr auf die Bereiche „öffentliches Parken an Autobahnen und Falschfahrererkennung“ ausgedehnt werden. Im dritten Schritt folgen die Abdeckung der weiteren Bereiche „Verkehrszählung und -klassifizierung“, sowie die mobil einsetzbare Variante. Auch wenn die Technologie zu großen Teilen identisch ist, müssen aufgrund der kleineren, unterschiedlichen Variationen separate elektronische und EMV-technische Abnahmen erfolgen. Daher scheint ein gestaffelter Markteintritt als sinnvoll.

## 6.2 MARKTEINTRITTSBARRIEREN UND STRATEGIEN ZU DEREN ÜBERWINDUNG

Die folgende Tabelle (Tabelle 30) aus dem existierenden Markteinführungskonzept listet die zu erwartenden Barrieren beim Eintritt in den Markt auf. Weiterhin zeigt sie auch die anzuwendenden Strategien zur Überwindung auftretender Probleme, ergänzt durch die aktuell bereits durchgeführten konkreten Maßnahmen:

**Tabelle 30:** Strategien zur Überwindung von Marktbarrieren

Markteintrittsbarriere	Strategie zur Überwindung	Aktuelle Maßnahmen
Abnahme und Zertifizierung	Vor der Markteinführung müssen Langzeittests in Form von Pilotbetrieben durchgeführt werden, um die einwandfreie Funktion dieses sicherheitsrelevanten Systems klar und lückenlos darzulegen.	Testfelder für die Entwicklung und einen Langzeitbetrieb wurden bereits eingerichtet und werden betrieben (vgl. Unterabschnitt 3.3). Zu den Testfeldern für Parkplatzbilanzierung kommt das offizielle Testfeld zur Falschfahrererkennung, welches bis Ende 2016 durch den Bund abgenommen wurde. Eine detaillierte Abstimmung der Resultate erfolgte Mitte 2017. Ein Abschlussbericht durch den Bund wird für Anfang 2018 erwartet. Die Systeme für den gewerblichen oder kommunalen Bereich sind durch die Pilotbetriebe ausreichend getestet und können nun in ein Produkt überführt werden.
	Um zu öffentlichen Ausschreibungen zugelassen zu werden, sind Abnahmen bzgl. der Detektionsgenauigkeit des Sensorsystems zu erbringen.	Durch die Testinstallation an der A9 auf dem Parkplatz Gelbelsee sind die Voraussetzungen für eine Abnahme des Systems erfolgt. Durch die Installation an der A45 Raststätte Sauerland-West konnte ein weiteres Testfeld geschaffen werden, das durch die Nähe zu den Partnern kurze Reaktionszeiten bei der rekursiven Entwicklung zuließ. Erste Test bzgl. Zertifizierung wurden den Richtlinien entsprechend durchgeführt, das System wird auf diese Anforderungen hin optimiert. Sowohl mit dem Landesbetrieb Straßen.NRW als auch mit dem Bund wurde über weitere Schritte gesprochen.
	Als nachgelagerte Prozesse des Projektes sind zudem weitere Zertifizierungen durch Test- und Prüfinstanzen (CE-Kennzeichnung, ...) unum-	Das aktuelle Hardware-Design erfolgte unter Beachtung der Voraussetzungen für elektronische Bauteile und Funkmodule. Eine Abnahme erfolgt nach Abschluss der Entwicklungen. Es wurden bereits Kontakte zu möglichen Lieferanten der

	gänglich.	Komponenten geknüpft und Angebote eingeholt, um die Hardware in die Marktreife zu überführen. Auch zu den notwendigen Prüfinstanzen bestehen bereits Kontakte (EMC-Test NRW, Cetecom, DEKRA Testing and Certification)
Bestehende Standards	Zudem muss das System europaweit an Standards angepasst werden (z. B. Datenformat DATEX II), um neben Deutschland auch weitere potenzielle Kunden europaweit gewinnen zu können. Dies wird mit dem System und den geplanten Schnittstellen der Smart-Data-Plattform abgeleistet.	Durch weitere Recherchen wurde die Wichtigkeit des Standards DATEX II nochmals bestätigt. Auch der Bund nennt diesen Datenstandard als Voraussetzung für weitere Schnittstellen der Datenweitergabe. Eine Umsetzung dieser Schnittstelle auf Seiten der Smart Data Plattform ist im Projekt erfolgt (vgl. Unterabschnitt 5.3).
Weiterreichende Marktanalyse, auch für das europäische Umland	Unterstützt durch renommierte Hochschulen wie die RWTH Aachen (Institut für Straßenwesen) und die Ruhr-Universität Bochum (Lehrstuhl für Volkswirtschaftspolitik), sowie die Unternehmensberatung Hans Eßer und Partner wurden Studien vorbereitet, um weitere Informationen zu den unter Punkt 6.1 genannten Märkten zusammenzutragen. Ziel ist es, nach dem Markteintritt in Deutschland schnell die Vermarktung im europäischen Umland zu starten.	Im ersten Schritt wurden eine professionelle Marktanalyse, eine Konkurrenzanalyse sowie eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für den deutschen Raum durchgeführt. Dieses Vorgehen wurde anschließend auf den europäischen Markt ausgedehnt. Ergebnisse dieser Studie sind in den Abschnitt 6.1 mit eingeflossen.

### 6.3 BEABSICHTIGTE MASSNAHMEN ZUR MARKTEINFÜHRUNG

#### Unternehmen S-Tec GmbH

Um die Ergebnisse des F&E-Projekts in das Produkt **MFDS** zu überführen und erfolgreich im Markt platzieren zu können, wurde die S-Tec GmbH gegründet. Das Patent, das Know-How und die Mitarbeiter werden Zug um Zug in die S-Tec GmbH ausgegliedert. Es werden zur professionellen Vermarktung und Weiterentwicklung des Unternehmens und des MFDS Gesellschaftsanteile an renommierte und ausgewählte Zielunternehmen angestrebt, um ein schnelles und erfolgreiches etablieren des Produktes im Markt zu erzielen.

#### Internetauftritt

Der Internetauftritt der Firma S-Tec GmbH ist ganzheitlich auf den Produktbereich MFDS fokussiert und wird eigenständig durch das Unternehmen verwaltet. Der Internetauftritt ist über mehrere Domains erreichbar: **[www.mfds.eu](http://www.mfds.eu)**, **[www.mfds.org](http://www.mfds.org)**, **[www.s-tec.gmbh](http://www.s-tec.gmbh)**.

Die Adresse **[www.mfds.eu](http://www.mfds.eu)** wird dabei werbeträchtig kommuniziert.

## Messeauftritt

Messen gewinnen zunehmend an Bedeutung, insbesondere im B2B-Bereich sind Messen ein beliebtes Marketinginstrument.

Durch den persönlichen Kontakt zum Fachpublikum können neue Kontakte geknüpft werden, die z. B. zu einem Verkauf des späteren Produkts führen oder in einer Kooperation zur Weiterentwicklung resultieren. Der Vorteil beim MFDS liegt in der einfachen Demonstration der Funktionsweise, wenn es z. B. um die Falschfahrerwarnung geht. So kann mithilfe der Exponate, d.h. den Leitpfosten, eine Falschfahrt simuliert werden, sodass der Besucher direkt ein Gefühl dafür entwickelt, wie sich das System im Straßenverkehr auswirkt.

Über die F&E-Projekte wurden bereits die Messen IAA 2015 (Gemeinschaftsstand NRW) und Hannover Messe 2016 (Gemeinschaftsstand des BMWi) als Aussteller besucht. Ziel war es, den Bekanntheitsgrad des MFDS weiter zu steigern und das „Falschfahrerwarnsystem“ zu präsentieren.

Angestrebt wird zudem durch Einladung der Aif / dem BMWi ein Exponat zum MFDS auf der CeBIT 2018.

## Networking

Um den Bekanntheitsgrad der Firma S-Tec und speziell des Produkts MFDS in den relevanten Märkten zu steigern, wird im Allgemeinen Networking auf verschiedenen Ebenen betrieben. Zum einen können die Forschungseinrichtungen, die in der Entwicklung des MFDS und den F&E-Projekten mitgewirkt haben, auf Ihren Veranstaltungen die Projekte und das Produkt bewerben. Zum anderen sind Mitgliedschaften der Wilhelm Schröder GmbH und nachfolgend der S-Tec GmbH beispielsweise bei der setac (Forschungsvereinigung Straßen- und Tunnelbau Aachen e.V.) oder der Smart City Allianz Dortmund von hoher Relevanz, um eine sich Lobby in der Politik zu schaffen.

Da der öffentlich-rechtliche Markt für ein solches System aus Ländern und Vertretern der Politik besteht, müssen der Nutzen für die Allgemeinheit und der Vorteil für die Bevölkerung eindeutig und detailliert dargestellt sein.

- Zu diesem Zweck wurde der Wilhelm Schröder GmbH ein erneuter Termin im „Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur“ BMVI gewährt. Mit der Abteilung für „Digitale Gesellschaft“ wurden diese Themen diskutiert.
- Auch auf Landesebene wurden mit dem ehemaligen NRW-Verkehrsminister und heutigem Verkehrsreferenten Oliver Wittke die Vorteile eines solchen Systems und die möglichen weiteren Schritte zur Einführung erörtert.
- Im Frühjahr 2017 besuchte BMVI-Staatssekretär Reiner Bomba die Wilhelm Schröder GmbH und machte sich mit dem System und seinem Entwicklungsstand vertraut.
- Im Sommer 2017 besuchte NRW-Verkehrsminister Hendrik Wüst die Testinstallation an der A45 Raststätte Sauerland-West und begutachtete die Fortschritte
- Bundestagsabgeordneter Dr. Matthias Heider unterstützt das System fortlaufend seitens der Politik

## Produktkatalog

Im Zuge der Marketing-Aktivitäten wird aktuell ein Produktkatalog entworfen, der die Funktionen des MFDS beschreibt und die Vorteile für den Kunden herausstellt. Der Produktkatalog soll dabei u.a. in



direktem Kundenkontakt eingesetzt werden und kann bei konkreten Gesprächen durch ein detailliertes Angebot, individuell auf die Anforderungen des Kunden zugeschnitten, ergänzt werden.

**Weitere Maßnahmen zur Markteinführung werden sein:**

- Teilnahme an öffentlichen Ausschreibungen
- Direct Mailing
- Above-the-Line Kommunikation
- Werbung in Fachmedien

**6.4 EINDEUTIGE TECHNISCHE UND WIRTSCHAFTLICHE ZIELKRITERIEN**

Die im Markteinführungskonzept definierten technischen und wirtschaftlichen Zielkriterien wurden im F&E-Projekt erreicht.

- Sensorsystem: Erstellung und Test eines ersten Funktionsmusters
- Simulationsumgebung: Die Simulationsumgebung diente im Projektverlauf zur weiteren Optimierung des Detektionsalgorithmus
- Smart-Data-Plattform: Komponenten der Smart-Data-Plattform für die Anbindung der Sensorsysteme mit exemplarischer Datenbereitstellung für Endkunden wurden prototypisch umgesetzt (siehe Abschnitt 5).
- Kommunikation und Sicherheit: Kriterien bzgl. der Kommunikation zwischen Sensorsystem und Smart-Data-Plattform wurden prototypisch umgesetzt.

Alle beschriebenen Komponenten werden nach Abschluss des F&E-Projekts vom Prototyp in ein Produkt überführt. Dieses erfolgt in Eigenentwicklung sowie mit strategischen Partnern.

**6.5 MEILENSTEINE ZUR ERREICHUNG DER FESTGELEGTEN ZIELKRITERIEN**

Folgende Meilensteine ergaben sich aus der Arbeitsplanung bzgl. der technischen Zielkriterien und wurden im Laufe des Projekts eingehalten:

**Tabelle 31:** Technische Zielkriterien

Bestandteil der Innovation	Meilensteine und Daten	Meilenstein erreicht
Anforderungsprofil der Gesamtinfrastruktur	31.08.2015 bzw. Endtermin AP1	✓
Evaluation abgeschlossen und Arbeitsumgebungen aufgebaut	30.11.2015 bzw. Endtermin AP2	✓

Hardware und Algorithmen festgelegt	28.02.2016 bzw. Endtermin AP3	✓
Erste Komponentenentwicklung für Feldtests abgeschlossen	31.07.2016 bzw. Endtermin AP5	✓
Kommunikationsfähiges Gesamtsystem im Feld installiert	31.12.2016 (anderer Termin)	✓
Validierung des Gesamtsystems (Smart-Data-Plattform/Sensorsystem) abgeschlossen	31.12.2017 bzw. Endtermin AP9	✓

Alle im Projekt gesetzten Meilensteine wurden erreicht.

Zu den im Projekt abgeschlossenen Zielkriterien ergeben sich nach Projektende Kriterien, die das prototypische Gesamtsystem in ein Produkt überführt und für den Vertrieb vorbereitet. Hierfür sind folgende Meilensteine und Daten vorgesehen:

**Tabelle 32:** nächste Schritte zur Markteinführung

Bestandteil	Meilensteine und Daten	Meilenstein erreicht
Geeignete Fertigungspartner für Sensorkomplex suchen	30.11.2017	✓
Sensorhardware nach technischen Anforderungen überarbeitet	15.04.2018	
Technische Abnahme und CE-Kennzeichnung der Produkthardware	31.05.2018	
Produkte (inkl. Gehäuse und Montageplanung) zum Vertrieb bereit	30.06.2018	
Plattform überarbeitet und zur Dauerbetrieb optimiert	30.06.2018	



Die zuständigen Partner:

Wilhelm Schröder GmbH  
Kai Okulla (Projektkoordinator)



TU Dortmund - Lehrstuhl für Kommunikationsnetze  
Prof. Dr.-Ing. Christian Wietfeld



Fachhochschule Dortmund  
Angewandte Softwareentwicklung, FB Informatik  
Prof. Dr. Sabine Sachweh