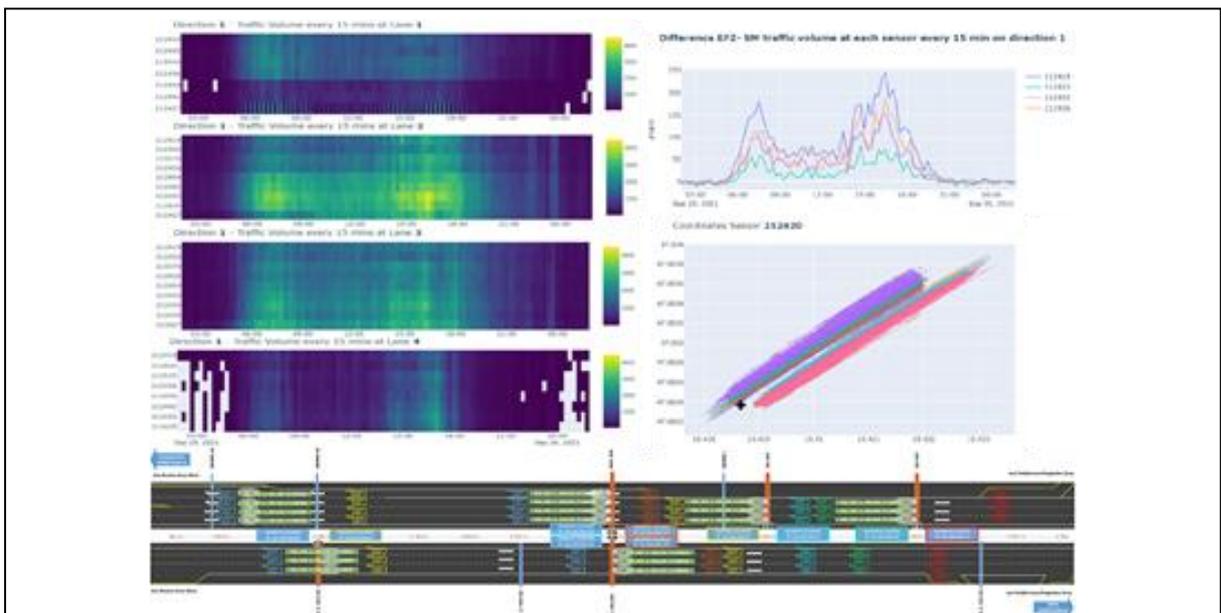


Holistische digitale Infrastruktur durch optimierte Erfassungs- und Analysemethoden des Verkehrsgeschehens HEAt

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung 2018
(VIF2018)

Dezember 2021



Impressum:

Herausgeber und Programmverantwortung:

Bundesministerium für Klimaschutz
Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien
Radetzkystraße 2
1030 Wien

 **Bundesministerium**
Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie

ÖBB-Infrastruktur AG
Praterstern 3
1020 Wien

 **ÖBB**
INFRA

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-
Aktiengesellschaft
Rotenturmstraße 5-9
1010 Wien

 **ASFiNAG**

Für den Inhalt verantwortlich:

Technische Universität Graz
Institut für Straßen- und Verkehrswesen (ISV)
Rechbauerstraße 12
8010 Graz

 **TU**
Graz

AIT
Austrian Institute of Technology GmbH
Giefinggasse 4
1210 Wien

 **AIT**
AUSTRIAN INSTITUTE
OF TECHNOLOGY

Know Center GmbH
Inffeldgasse 13
8010 Graz

 **KNOW**
Center

Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Thematische Programme
Sensengasse 1
1090 Wien

 **FFG**
Forschung wirkt.

Holistische digitale Infrastruktur durch optimierte Erfassungs- und Analysemethoden des Verkehrsgeschehens HEAt

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung
(VIF2018)

AutorInnen:

Dipl.-Ing. Michael Haberl (ISV)

Dipl.-Ing. Felix Hofinger (ISV)

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Fellendorf (ISV)

Dipl.-Ing. Paul Rosenkranz (AIT)

Dipl.-Ing. Jürgen Zajicek (AIT)

Mag. Mario Lovric (KC)

Dipl.-Ing. Robert Wenig (KC)

Dipl.-Ing. Han Tran (KC)

Dipl.-Ing. Christian Partl (KC)

Dipl.-Ing. Santokh Singh (KC)

Auftraggeber:

Bundesministerium für Klimaschutz

ÖBB-Infrastruktur AG

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

Auftragnehmer:

TU Graz / Institut für Straßen- und Verkehrswesen (ISV)

AIT / Austrian Institute of Technology GmbH

KC / Know Center GmbH

INHALTSVERZEICHNIS

Inhaltsverzeichnis	5
Abbildungsverzeichnis	6
1. Einleitung	11
2. Methodik und Ergebnisse	13
2.1. Marktrecherche und Sensorauswahl	14
2.2. Radarsystem Smartmicro	17
2.3. Streckenband, Sensoraufbau und Integration	20
2.4. Smartmicro TMC - Traffic Management Configurator	24
2.5. Datengrundlage – Datensätze	25
2.6. Datenbank und Analysemodule	28
2.7. Datenanalyse	31
2.7.1. Verkehrsstärkeauswertungen	31
2.7.2. Fahrzeugklassifikation	34
2.7.3. Verkehrsstärke- und Geschwindigkeitsganglinien unterschiedlicher Fahrzeugklassen	35
2.7.4. Verkehrsstärkeganglinien-Vergleich zwischen Smartmicro Radardaten vs. Einzelfahrzeug-Datensatz	37
2.7.5. Geschwindigkeitsverteilungen und -histogramme	40
2.7.6. Fundamentaldiagramm-Darstellung	43
2.7.7. Sensorreichweitenanalyse	46
2.8. Trajektorienanalyse	49
3. Zusammenfassung	54
3.1. Projektfazit	54
3.2. Weiterer zukünftiger Entwicklungsbedarf	56
4. Literatur	58
5. Anhang	59
5.1. Verkehrsstärkeganglinien Per Vehicle Data – 30.11.2021	59
5.2. Geschwindigkeitsganglinien Per Vehicle Data – 30.11.2021	62
5.3. Verkehrsstärken-/Geschwindigkeitsganglinien Per Vehicle Data – 30.11.2021 ..	65
5.4. Vergleich Smartmicro Radardaten vs. EFZ Einzelfahrzeugdaten	68
5.4.1. 29.09.2021 - 15 Minuten Intervall	68
5.4.2. 18.11.2021 - 15 Minuten Intervall	69
5.4.3. 30.11.2021 - 15 Minuten Intervall	71
5.5. Fundamentaldiagramme Per Vehicle Data – 30.11.2021	72

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Sensorik der ALP.Lab Strecke sowie Verkehrsdatendetektoren an VBA-Brücke (Harrer et al., 2018).....	14
Abbildung 2: Valerann – IoT Multisensor (https://www.valerann.com/technology)	16
Abbildung 3: Smartmicro Radarsensor TRUGRD Stream mit integrierter Videokamera ...	17
Abbildung 4: Streckenband mit Sensorübersicht.....	21
Abbildung 5: Streckenband mit Sensorausrichtung und schematischer Detektionsbereiche	21
Abbildung 6: Streckenband Detektionsbereiche und Messquerschnitte	22
Abbildung 7: Sensoraufbau auf der ASFINAG Teststrecke Graz - A2 183,948km bis 185,104km.....	22
Abbildung 8: Ein Eintragsbeispiel in der MongoDB	23
Abbildung 9: Smartmicro TMC (Traffic Management Configurator) Benutzeroberfläche ..	24
Abbildung 10: Aufbau und Attribute des Smartmicro „Per Vehicle“ Datensatz.....	26
Abbildung 11: Aufbau und Attribute des Smartmicro „Statistics“ Datensatz.....	26
Abbildung 12: Aufbau und Attribute des Smartmicro „Object data“ Datensatz.....	27
Abbildung 13: Systemarchitektur Datenverarbeitung und -speicherung in der MongoDB.	28
Abbildung 14: Fahrstreifenfeine Verkehrsstärke aus Smartmicro „Per Vehicle Data“ Datensatz – Fahrstreifenfeiner Gesamtüberblick	32
Abbildung 15: Verkehrsstärkevergleich zwischen „Per Vehicle Data“ und „Statistics Data“ – 30.11.2021 – 15min Intervall.....	32
Abbildung 16: Verkehrsstärkevergleich zwischen Messquerschnitten anhand „Per Vehicle Data“ Fahrtrichtung Klagenfurt.....	33
Abbildung 17: Verkehrsstärkevergleich zwischen Messquerschnitten anhand „Per Vehicle Data“ Fahrtrichtung Wien.....	33
Abbildung 18: Fahrzeugklassifizierung für 9 Fahrzeugklassen anhand „Per Vehicle Data“	34
Abbildung 19: Fahrzeugklassifizierung PKW und LKW anhand „Per Vehicle Data“.....	34
Abbildung 20: Längenverteilung der Fahrzeugklassen aus dem „Per Vehicle Data“ Datensatz	35
Abbildung 21: Gesamtverkehr Verkehrsstärkeganglinien Smartmicro „Per Vehicle Data“ Datensatz 30.11.2021	35
Abbildung 22: PKW und LKW Verkehrsstärke Ganglinien Smartmicro „Per Vehicle Data“ Datensatz 30.11.2021	36

Abbildung 23: PKW und LKW Geschwindigkeitsganglinien Smartmicro „Per Vehicle Data“ Datensatz 30.11.2021	36
Abbildung 24: Verkehrsstärke- und Geschwindigkeitsganglinien unterschiedlicher Fahrzeugklassen Sensor 212419 Fahrtrichtung Klagenfurt – 30.11.2021	37
Abbildung 25: Verkehrsstärke Ganglinien Vergleich Smartmicro Radardaten vs. Einzelfahrzeug-Datensatz – 30.11.2021	38
Abbildung 26: Verkehrsstärke Ganglinien Vergleich Smartmicro Radardaten vs. Einzelfahrzeug-Datensatz – 30.11.2021	38
Abbildung 27: Verkehrsstärke Vergleich Smartmicro Radardaten vs. Einzelfahrzeug-Datensatz – 30.11.2021 -15min Intervall.....	39
Abbildung 28: Verkehrsstärke Vergleich Smartmicro Radardaten vs. Einzelfahrzeug-Datensatz – PKW-Datensatz - 30.11.2021 -15min Intervall.....	39
Abbildung 29: Verkehrsstärke Vergleich Smartmicro Radardaten vs. Einzelfahrzeug-Datensatz – LKW-Datensatz - 30.11.2021 -15min Intervall	40
Abbildung 30: Geschwindigkeitsverteilung Fahrtrichtung Klagenfurt – 30.11.2021.....	41
Abbildung 31: Geschwindigkeitshistogramm Fahrtrichtung Klagenfurt – 30.11.2021	41
Abbildung 32: Geschwindigkeitsverteilung Fahrtrichtung Wien – 30.11.2021.....	42
Abbildung 33: Geschwindigkeitshistogramm Fahrtrichtung Wien – 30.11.2021	42
Abbildung 34: Fundamentaldiagramm-Darstellung Sensor 212419 – 3 Werktage 1min Intervall.....	44
Abbildung 35: Fundamentaldiagramm-Darstellung Sensor 212419 – 3 Werktage 5min Intervall.....	44
Abbildung 36: Fundamentaldiagramm-Darstellung EFZ Einzelfahrzeug Langzeitdaten - 31.03.2021-30.11.2021	45
Abbildung 37: Dreiteilige Fundamentaldiagramm-Darstellung EFZ Einzelfahrzeug Langzeitdaten - 31.03.2021-30.11.2021.....	46
Abbildung 38: Erfassungsbereich Smartmicro „Object Data“ – 30.11.2021	47
Abbildung 39: Erfassungsbereich Navtech Radardate– 30.11.2021.....	47
Abbildung 40: Sensordistanzanalyse aus Smartmicro Object Data facing Attribut – 30.11.2021.....	48
Abbildung 41: Sensordistanzanalyse aus Smartmicro Object Data frontFacing Attribut – 30.11.2021.....	48
Abbildung 42: Ablaufschematik Trajektorienanalyse	49
Abbildung 43: movingpandas und Stitching Fußgängertrajektorien.....	50
Abbildung 44: Punktwolkendarstellung der Sensoren Smartmicro und Navtech.....	50

Abbildung 45: Heatmapdarstellung der Punktwolken für Sensorquerschnitt 212427	51
Abbildung 46: Erfasste Trajektorien und berechnete Geschwindigkeiten nach movingpandas-Methodik.....	51
Abbildung 47: Erfasste Längen der Trajektorien je Sensor-ID.....	52
Abbildung 48: Ergebnisse Trajektorien mit Lage in Fahrstreifengeometrie im Baustellenbereich	52
Abbildung 49: PKW und LKW Verkehrsstärkeganglinien Fahrtrichtung Klagenfurt - 30.11.2021 – 15min Intervall.....	59
Abbildung 50: PKW und LKW Verkehrsstärkeganglinien Fahrtrichtung Wien - 30.11.2021 – 15min Intervall	59
Abbildung 51: Fahrstreifenfein PKW Verkehrsstärkeganglinien Fahrtrichtung Klagenfurt - 30.11.2021 – 15min Intervall.....	60
Abbildung 52: Fahrstreifenfein PKW Verkehrsstärkeganglinien Fahrtrichtung Wien - 30.11.2021 – 15min Intervall.....	60
Abbildung 53: Fahrstreifenfein LKW Verkehrsstärkeganglinien Fahrtrichtung Klagenfurt - 30.11.2021 – 15min Intervall.....	61
Abbildung 54: Fahrstreifenfein LKW Verkehrsstärkeganglinien Fahrtrichtung Wien - 30.11.2021 – 15min Intervall.....	61
Abbildung 55: PKW und LKW Geschwindigkeitganglinien Fahrtrichtung Klagenfurt - 30.11.2021 – 15min Intervall.....	62
Abbildung 56: PKW und LKW Geschwindigkeitganglinien Fahrtrichtung Wien - 30.11.2021 – 15min Intervall.....	62
Abbildung 57: Fahrstreifenfeine PKW Geschwindigkeitganglinien Fahrtrichtung Klagenfurt - 30.11.2021 – 15min Intervall.....	63
Abbildung 58: Fahrstreifenfeine PKW Geschwindigkeitganglinien Fahrtrichtung Wien - 30.11.2021 – 15min Intervall.....	63
Abbildung 59: Fahrstreifenfeine LKW Geschwindigkeitganglinien Fahrtrichtung Klagenfurt - 30.11.2021 – 15min Intervall.....	64
Abbildung 60: Fahrstreifenfeine LKW Geschwindigkeitganglinien Fahrtrichtung Wien - 30.11.2021 – 15min Intervall.....	64
Abbildung 61: PKW und LKW Verkehrsstärken-/Geschwindigkeitganglinien Fahrtrichtung Klagenfurt - 30.11.2021 – 15min Intervall.....	65
Abbildung 62: PKW und LKW Verkehrsstärken-/Geschwindigkeitganglinien Fahrtrichtung Wien - 30.11.2021 – 15min Intervall.....	65
Abbildung 63: Fahrstreifenfeine PKW Verkehrsstärken-/Geschwindigkeitganglinien Fahrtrichtung Klagenfurt - 30.11.2021 – 15min Intervall.....	66

Abbildung 64: Fahrstreifenfeine PKW Verkehrsstärken-/Geschwindigkeitsganglinien Fahrtrichtung Wien - 30.11.2021 – 15min Intervall.....	66
Abbildung 65: Fahrstreifenfeine LKW Verkehrsstärken-/Geschwindigkeitsganglinien Fahrtrichtung Klagenfurt - 30.11.2021 – 15min Intervall.....	67
Abbildung 66: Fahrstreifenfeine LKW Verkehrsstärken-/Geschwindigkeitsganglinien Fahrtrichtung Wien - 30.11.2021 – 15min Intervall.....	67
Abbildung 67: Vergleich Smartmicro Radardaten vs. EFZ Einzelfahrzeugdaten – Gesamtverkehr 29.09.2021 – 15min Intervall.....	68
Abbildung 68: Vergleich Smartmicro Radardaten vs. EFZ Einzelfahrzeugdaten – PKW- Verkehr 29.09.2021 – 15min Intervall	68
Abbildung 69: Vergleich Smartmicro Radardaten vs. EFZ Einzelfahrzeugdaten – LKW- Verkehr 29.09.2021 – 15min Intervall	69
Abbildung 70: Vergleich Smartmicro Radardaten vs. EFZ Einzelfahrzeugdaten – Gesamtverkehr 18.11.2021 – 15min Intervall.....	69
Abbildung 71: Vergleich Smartmicro Radardaten vs. EFZ Einzelfahrzeugdaten – PKW- Verkehr 18.11.2021 – 15min Intervall	70
Abbildung 72: Vergleich Smartmicro Radardaten vs. EFZ Einzelfahrzeugdaten – LKW- Verkehr 18.11.2021 – 15min Intervall	70
Abbildung 73: Vergleich Smartmicro Radardaten vs. EFZ Einzelfahrzeugdaten – Gesamtverkehr 30.11.2021 – 15min Intervall.....	71
Abbildung 74: Vergleich Smartmicro Radardaten vs. EFZ Einzelfahrzeugdaten – PKW- Verkehr 30.11.2021 – 15min Intervall	71
Abbildung 75: Vergleich Smartmicro Radardaten vs. EFZ Einzelfahrzeugdaten – LKW- Verkehr 30.11.2021 – 15min Intervall	72
Abbildung 76: Fundamentaldiagramm-Darstellung Sensor 212419 – 30.11.2021 - 1min Intervall.....	72
Abbildung 77: Fundamentaldiagramm-Darstellung Sensor 212420 – 30.11.2021 - 1min Intervall.....	73
Abbildung 78: Fundamentaldiagramm-Darstellung Sensor 212427 – 30.11.2021 - 1min Intervall.....	73
Abbildung 79: Fundamentaldiagramm-Darstellung Sensor 212433 – 30.11.2021 - 1min Intervall.....	73
Abbildung 80: Fundamentaldiagramm-Darstellung Sensor 212435 – 30.11.2021 - 1min Intervall.....	74
Abbildung 81: Fundamentaldiagramm-Darstellung Sensor 212436 – 30.11.2021 - 1min Intervall.....	74

Abbildung 82: Fundamentaldiagramm-Darstellung Sensor 212442 – 30.11.2021 - 1min Intervall	74
Abbildung 83: Fundamentaldiagramm-Darstellung Sensor 212447 – 30.11.2021 - 1min Intervall	75
Abbildung 84: Fundamentaldiagramm-Darstellung Sensor 212454 – 30.11.2021 - 1min Intervall	75
Abbildung 85: Fundamentaldiagramm-Darstellung Sensor 215570 – 30.11.2021 - 1min Intervall	75

1. EINLEITUNG

Die ASFINAG nutzt die Vorteile verschiedener Sensortechnologien (u.a. Induktionsschleifen, Radar-, Infrarot-, Video-Detektoren, etc.) zur Erfassung des Verkehrs am hochrangigen Streckennetz. Die vorhandenen Sensoren werden jeweils für spezifische Anwendungen eingesetzt, weisen jedoch auch gewisse Grenzen und damit Nachteile auf. Im Hinblick auf steigende Anforderungen, mitunter durch fortschreitenden Entwicklungen automatisierten Fahrens, steigt für Infrastrukturbetreiber der Bedarf nach integrierten und optimierten Systemen zur Erfassung des aktuellen Verkehrsgeschehens, um weiterhin ein effizientes Verkehrsmanagement gewährleisten zu können, wobei hier die digitale Infrastruktur künftig einen noch höheren Stellenwert einnehmen wird. Gerade in punkto einer flächendeckender Ausrollung von qualitativ hochwertigen und leistungsfähigen Sensorsystemen stoßen Infrastrukturbetreiber weltweit auf Grenzen bezüglich der Kostenintensität der Sensoren.

Im Rahmen des Forschungsprojektes HEAt wurden eingehende Analyse der bereits am ASFINAG-Netz erhobenen und vorhandenen Sensordaten durchgeführt, um auf diesen Erkenntnisstand aufbauend die Einbindung neuer noch nicht in Verwendung befindlicher Sensorik zur Erfassung des aktuellen Verkehrsgeschehens voranzutreiben. Der Fokus lag hier insbesondere auf Sensorsystemen die eine hochauflösende Fahrzeugpositionserkennung mit möglichst genauen Fahrzeug-Parameter (Klassifizierung, Länge, Breite) ermöglicht und neben Querschnittsdaten und Einzelfahrzeugdaten auch Trajektorienanalysen erlauben. Somit kann die Projektausrichtung im Forschungsprojekt HEAt in folgende drei Kernthemen eingeteilt werden:

- Markterhebung von geeigneten nicht invasiven Sensorsystemen zur Erfassung des aktuellen Verkehrsgeschehens, darauf anschließende Sensorauswahl und -bestellung
- Aufbau, Integration und prototypische Anwendung des neuen Sensorsystems für die Erfassung des Verkehrsgeschehens und von Fahrzeug-Trajektorien innerhalb eines abgesteckten Feldtests
- Aufbau einer Datenbank sowie darauf laufende Analysemodule zur Qualitätsbeurteilung des neuen Sensorsystems, um Erkenntnisse bei der Parametrierung und Konfiguration des neuen Sensorsystems sammeln zu können

Somit ergibt das zu testende Sensorsystem und die darauf basierenden und entwickelten Analysemodule ein Gesamtsystem zur flächendeckenden und zuverlässigen Erfassung des Verkehrsgeschehens. Folgende Merkmale des Gesamtsystems wurden laut Ausschreibungsleitfaden als Mindestanforderung angesehen und mussten bei der Sensorauswahl, dem Aufbau der Analysemodule und bei der Konfiguration sowie Parametrierung der Sensoren Berücksichtigung finden:

- Ausgabe von aggregierten Verkehrsparametern (Verkehrsmengen, Durchschnittsgeschwindigkeit, Geschwindigkeitsverteilungen, Nettozeitlücken zwischen Fahrzeugen, Verkehrsdichte pro Stunde und Fahrtrichtung)
- Ausgabe von Einzelfahrzeugdaten (Position, Spur, Einzelgeschwindigkeiten, Fahrzeugklasse, Fahrzeuglänge)
- Nachverfolgung von Fahrzeugen (Trajektorien) in möglichst hoher Genauigkeit und Durchgängigkeit
- Fahrzeuglänge bzw. -klassifizierung in min. 3 Klassen (PKW, LKW, Sonstige)
- Erkennbarkeit und Detektion von Ereignissen (Stau, Geisterfahrer, stehengebliebene Fahrzeuge, Langsamfahrer, verlorene Objekte)
- Erfassungsrichtung beider Fahrtrichtungen mit einem Erfassungsbereich durchgängig min. 500 m ohne Blindspots
- Genauigkeit:
 - Erfasste Fahrzeuge 90% genau
 - X/Y Koordinaten (Lage) von 20 cm über den gesamten Detektionsbereich bzw. zeitliche Auflösung min 200 ms
 - Geschwindigkeit auf 5% genau
 - Klassifizierung auf 85% genau
- Bereitstellung der Daten in einer Datenbank für min. 24 h
- Netzwerктаuglichkeit mit max. Bandbreite von 10 MBit/s je Sensor
- Qualitätssicherungsmechanismen (Störungsmeldung, Konfidenzwerte, etc.)
- Zentrale Diagnose, (teilautomatisierte) Konfiguration und Parametrierung eventuell über eine WebGUI
- Die Montage des Sensors sollte auf Masten/ Gantries „above-ground“ möglich sein ohne Störungen anderer vorhandener Systeme (z.B. Mauteinhebung, etc.)
- Wetter- und Temperaturunabhängig (robuste Ergebnisse bei Regen und Schneefall)
- Beleuchtungsunabhängig (bei Tag und Nacht, Schatten, Nebel werden gleiche Ergebnisse erzielt)

2. METHODIK UND ERGEBNISSE

Das Kapitel 2 umfasst die inhaltliche Beschreibung der im Forschungsprojekt HEAt durchgeführten Arbeiten und zeigt in komprimierter Form die Erkenntnisse welche in der Laufzeit des Projektes erzielt werden konnten. In Abschnitt 2.1 wird auf die im Projekt vollzogene Marktrecherche von Sensorsystemen eingegangen und eine Übersicht diverser näher betrachteter Sensoren geliefert. Die Erkenntnisse der Marktrecherche mündete in der Auswahl eines spezifischen Sensors welcher im Projekt HEAt innerhalb eines Feldtests auf dessen Qualität und Potential näher untersucht wurde. Abschnitt 2.2 beschreibt das ausgewählte Sensorsystem genauer und stellt dessen Spezifikationen dar. Abschnitt 2.3 widmet sich näher dem konkreten Feldtest und beschreibt den Streckenabschnitt auf welchen die zu testenden Sensoren aufgebaut und integriert wurden. Ein Hauptziel innerhalb des Projektes war es erste Erkenntnisse und Qualitätsbeurteilungen der neuen Sensorik zu generieren, um darauf basierend die Parametrierungen und Konfigurationen der einzelnen Sensoren vollziehen zu können. Diese Konfiguration erfolgte mit einer sensorspezifischen Software, welche in Abschnitt 2.4 kurz beschrieben wird. Abschnitt 2.6 beschreibt anschließend die Datengrundlagen welche innerhalb des Projektes zur Verfügung standen. Ein erheblicher Aufwand innerhalb des Projektes HEAt wurde in der Bereitstellung der Sensordaten innerhalb einer Datenbank gesteckt und in die darauf aufbauenden programmierten Analysemodule, um die Sensordaten auf deren Qualität prüfen zu können. Die Ausführungen zu diesem elementaren Baustein werden in Abschnitt 2.6 näher erläutert, ehe in Abschnitt 2.7 näher auf die konkreten Datenanalysen eingegangen wird. Dieser Abschnitt bildet auch den umfangreichsten Teil dieses Berichts und zeigt die grafisch aufbereiteten Datenanalysen der Qualitätsbeurteilung der Sensoren, welche bei der Parametrierung und Konfiguration der Sensoren in einem iterativen Prozess zur Verbesserung der Datenqualität beigetragen haben. In Abschnitt 2.8 werden zudem erste Erkenntnisse gezeigt, welche bei der Nachverfolgung von Fahrzeugen in Form von Fahrzeugtrajektorien innerhalb des Projektes erzielt werden konnten.

2.1. Marktrecherche und Sensorauswahl

Die Erfassung von Verkehrs- und auch Umfelddaten erfolgt anhand stationärer Sensorik, welche flächendeckend entweder im Zuge der Errichtung einer Verkehrsbeeinflussungsanlage oder unter Verwendung der Überkopfbügel des Mautsystems der ASFINAG verbaut wird. Zur Erfassung von Verkehrsdaten kommen verschiedenste Technologien zum Einsatz (Induktionsschleifen, Radar-, Infrarot- und Ultraschall-Detektoren), siehe Abbildung 1. Punktuell kommen darüber hinaus auch dynamische Achslastwaagen (Weigh in Motion) zur Anwendung, diese werden allerdings nicht zur Verkehrssteuerung verwendet. Alle Sensoren haben Vorteile und Nachteile und werden jeweils für spezielle Anwendung eingesetzt. Im Sinne eines effizienten Verkehrsmanagements unter zu erwartenden hohen zusätzlichen Anforderungen durch automatisiertes Fahren steigt für den Infrastrukturbetreiber der Bedarf nach integrierten und optimierten Systemen zur Erfassung des aktuellen Verkehrsgeschehens über die digitale Infrastruktur.

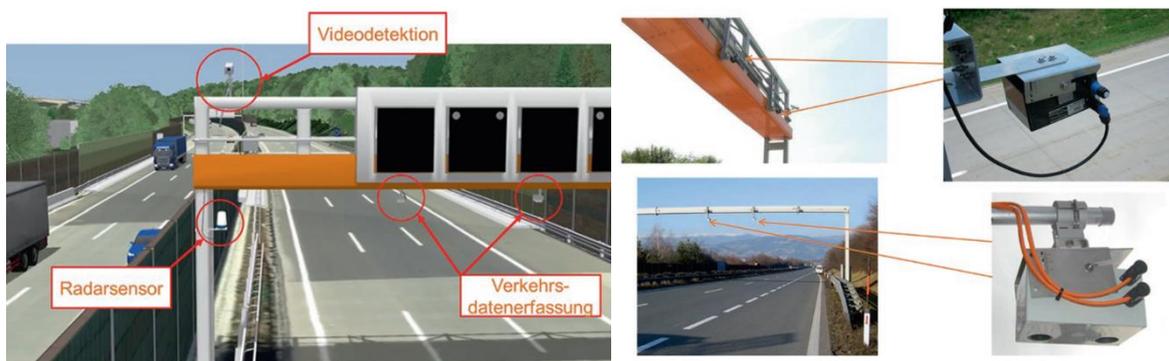


Abbildung 1: Sensorik der ALP.Lab Strecke sowie Verkehrsdatendetektoren an VBA-Brücke (Harrer et al., 2018)

Die erfassten Verkehrsdaten werden für die Zwecke der Verkehrsbeeinflussung allgemein als Kurzzeitdaten mit einem Erfassungszyklus von einer Minute bzw. zukünftig 15 Sekunden erfasst und übertragen. Langzeitdaten werden hauptsächlich für statistische Zwecke verwendet. In VMIS 2.0 werden auch Daten mobiler Sensorik (Intelligenter Warnleitanhänger) und der Verkehrsdatensensorik im Tunnel für die Verkehrssteuerung miteingebunden. Mit der Entwicklung des automatisierten Fahrens muss zukünftig auch an der Einbindung der fahrzeugbasierten Sensorik gedacht werden. Über zusätzliche Kommunikationseinrichtungen wie ITS-G5 stehen in weiterer Folge Verkehrsteilnehmern auf verschiedenen Wegen Daten der ASFINAG während der Fahrt zur Verfügung. Die ASFINAG arbeitet darüber hinaus an der Einführung neuer stationärer Sensorik.

Da es zu inhaltlichen Zielpräzisierungen bei der Sensorauswahl gekommen ist, musste die Konzeption der angedachten Sensorerweiterung adaptiert werden. Die im Antrag vorgeschlagenen Bluetooth-Sensoren und Wärmebildkameras wurden im HEAt-Gesamtsystem verworfen. Anstatt dessen wurde eine extensive Markterhebung mit dem Fokus auf Sensoren vollzogen, welche eine hochauflösende Fahrzeugpositionserkennung mit möglichst genauen Fahrzeug-Parametern (Klassifizierung, Länge, Breite) erlaubt. Hierbei wurden speziell Radarsensoren für die Erfassung von Fahrzeug-Trajektorien als besonders gut geeignet eruiert und ein geeigneter Radarsensor der Firma Smartmicro für den prototypischen Einsatz im Feldtest festgelegt und bestellt. Es wurde die neueste am Markt befindliche Technologie des **Smartmicro Radarsensor TRUGRD Stream** ausgewählt. Dieser Sensor wird in folgendem Abschnitt 2.2 näher beschrieben. Neben diesem Radarsensor wurden auch alternative Radarsensoren in der Marktrecherche betrachtet. Folgende Tabelle zeigt eine kurze Übersicht der näher betrachteten Alternativsensoren. Innerhalb der Marktrecherche wurde mit den einzelnen Anbieter persönlicher Kontakt gepflegt, um die Umsetzbarkeit einer Sensorbestellung und Einbindung und Integration in das ASFINAG-Netz in der Laufzeit des Forschungsprojektes HEAt sicherzustellen.

Tabelle 1: Sensorübersicht der Marktrecherche

Smartmicro Radarsensor TRUGRD Stream	https://www.smartmicro.com/traffic-radar/#c100
Navtech Radar CTS350-X	https://navtechradar.com/clearway-technical-specifications/
BYDA Sensor & System - BSS-RAD-GEN1 V4	http://www.bydasensor.com/prod/prod02.jhtml
FLIR TrafiRadar (Kombiniert Video- und Radar-Sensor)	https://www.flir.eu/products/trafiradar/
Wavetronics: SmartSensor HD	https://www.wavetronix.com/products/smartsensor-hd
AGD 343 Highways Monitoring Radar	https://www.agd-systems.com/agd_product/radar-traffic-detector-343/
Valerann – IoT Multisensor	https://www.valerann.com/technology

Eine Sonderstellung in der Marktrecherche stellte der IoT Multisensor der Firma Valerann dar. Dieser Sensor befindet sich jedoch noch in der Testphase und entspricht einem invasiven Sensor, der in der Fahrbahnoberfläche in knappen Abständen situiert wird. Diese Sensoren ermöglichen auch durch farbliche Veränderung unterschiedliche Use Cases in

der Verkehrssteuerung. Weitere Entwicklungen dieses Sensorsystems gilt es zu beobachten, inwiefern dieser Sensor zukünftiges Potential bei der Verkehrssteuerung aufweist.

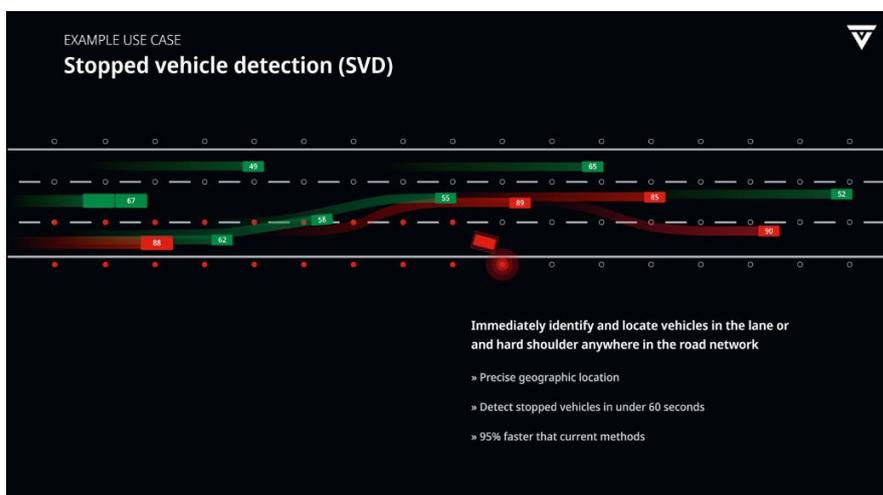
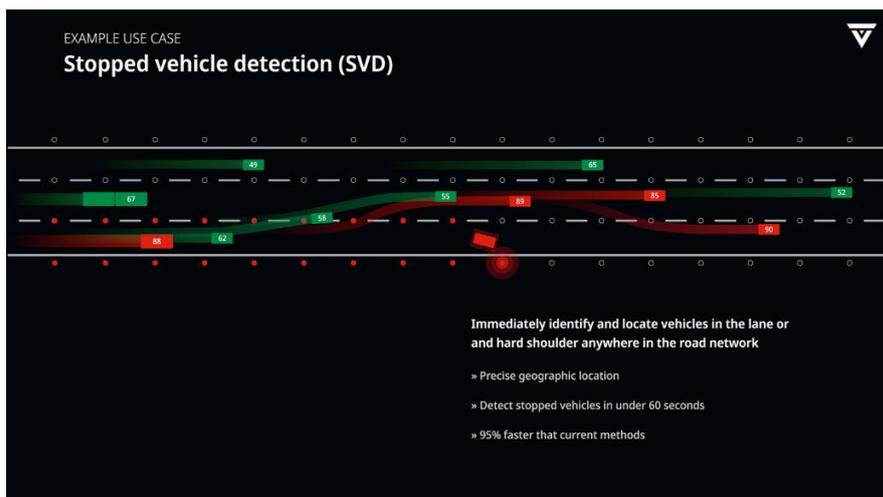
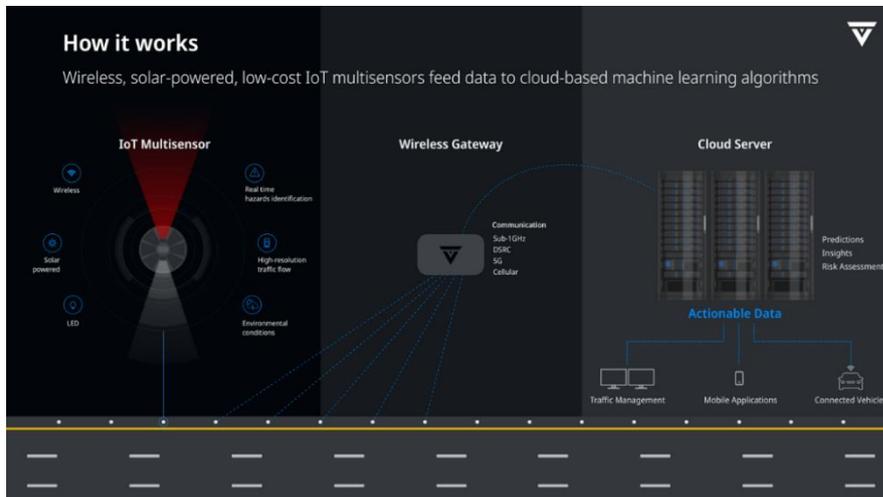


Abbildung 2: Valerann – IoT Multisensor (<https://www.valerann.com/technology>)

2.2. Radarsystem Smartmicro

Da es zu inhaltlichen Zielpräzisierungen bei der Sensorauswahl gekommen ist, musste die Konzeption der angedachten Sensorerweiterung adaptiert werden. Die im Antrag vorgeschlagenen Bluetooth-Sensoren und Wärmebildkameras wurden im HEAt-Gesamtsystem verworfen. Anstatt dessen wurde eine extensive Markterhebung mit dem Fokus auf Sensoren vollzogen, welche eine hochauflösende Fahrzeugpositionserkennung mit möglichst genauen Fahrzeug-Parametern (Klassifizierung, Länge, Breite) erlauben. Hierbei wurden speziell Radarsensoren für die Erfassung von Fahrzeug-Trajektorien als besonders gut geeignet eruiert und ein geeigneter Radarsensor der Firma Smartmicro für den prototypischen Einsatz im Feldtest festgelegt und bestellt. Es wurde die neueste am Markt befindliche Technologie des smart Smartmicro micro Radarsensor TRUGRD Stream ausgewählt. Der TRUGRD Stream kombiniert eine Videokamera mit einem 24-GHz-Radar mit ultra-hochauflösender 4D/UHD+-Technologie. Der Radarsensor misst Reichweite, Radialgeschwindigkeit, horizontalen und vertikalen Winkel, Reflexionsvermögen und Parameter von stationären und beweglichen Objekten gleichzeitig. Der Radarsensor ist nahezu unabhängig von Wetter-, Temperatur- und Lichtverhältnissen, was eine Grundanforderung bei der Sensorauswahl innerhalb der Marktrecherche darstellte.



Abbildung 3: Smartmicro Radarsensor TRUGRD Stream mit integrierter Videokamera

Die im Sensor verbaute Farbkamera hat einen Infrarot (IR) Filter und wurde so entwickelt, dass sie auch bei sehr schwache Lichtverhältnissen hohe Detektionsraten aufweist. Der Sensor bereitet intern die Messdaten auf und übermittelt mittels einer Kommunikationsschnittstelle die aufbereiteten Daten an eine freidefinierbare Netzwerkadresse weiter. Damit konnte eine direkte Anbindung an einen interne Hadoop-Cluster der Asfinag eingerichtet werden (siehe auch Abschnitt 2.6).

Die angekauften Sensoren stellten eine Neuentwicklung dar und wurden kurz nach deren Markteinführung mit etwa 3 Monaten Verspätung geliefert. Die Sensoren wurde im Oktober 2021 an den von der ASFINAG beauftragten Systemintegrator übergeben, welcher die Montage der Sensoren (mechanisch und elektrotechnisch) durchführte. Die insgesamt 10 Sensoren wurden auf 3 Anzeigebürden über den Fahrbahnen der Teststrecke Graz der A2 zwischen 183,948km bis 185,104km montiert (siehe auch Abschnitt 2.3), um die vom Hersteller vorgegebene montagehöhe einzuhalten und die Erfassungsgenauigkeit zu erhöhen. In darauffolgenden Iterationsschritten wurde festgestellte Probleme bei der Kommunikationsschnittstelle gemeinsam mit dem Lieferanten behoben.

Der TRUGRD Stream Sensor kombiniert eine Videokamera mit einem 24-GHz-Radar für die Erfassung von Fahrzeugen auf mehreren Fahrstreifen durch die Anwendung der 4D/UHD+ Technologie. Damit ist es möglich Objekte mit 3D-Koordinaten über den Zeitraum zu verfolgen, während dem sie sich im Sensorbereich befinden. Die Videokamera und das Radar sind in einem Gehäuse integriert, wobei beide als unabhängige Geräte arbeiten. Der Radarsensor detektiert die einzelnen Objekte und der Kamerastream dient zur Erfassung der aktuellen Verkehrssituation, um die Ergebnisse des Radarsensors visuell zu validieren.

Der Radarsensor misst die Reichweite, die Radialgeschwindigkeit, den horizontalen und vertikalen Winkel, das Reflexionsvermögen und weitere Parameter von mehreren stationären und beweglichen Objekten gleichzeitig. Die Reichweite beträgt etwa 300m, wobei bis zu 12 Fahrstreifen abgedeckt werden können. Die besten Detektionsergebnisse werden erzielt, wenn sich keine Hindernisse wie Brücken, Überkopfanzeigen, etc. im Sensorbereich befinden. Der Sensor ist in der Lage, ultrahochauflösend (4D/UHD+) zu messen. Durch den MIMO-Antennenbetrieb und hochauflösende Algorithmen erreicht der Radarsensor je nach Konfiguration ein besonders hohes Trennvermögen bei Objekten (UHD+) und eine dazu gehörende Höhenmessung. Dadurch kann auch eine Unterscheidung von Fahrzeugtypen (PKW, LKW, etc.) stattfinden. Der Radarsensor wird durch Wetter-, Temperatur- und Lichtverhältnissen nahezu nicht beeinflusst

Durch das 4D-Doppler-basiertes Prinzip zur radialen Bewegungserkennung können

- eine direkte, eindeutige Dopplermessung (Geschwindigkeit),
- eine direkte Entfernungsmessung,
- eine direkte Azimutwinkelmessung (Horizontalwinkel) und eine
- eine direkte Elevationswinkelmessung (Vertikalwinkel)

erfolgen. Dadurch können bis zu 256 bewegte Objekte gleichzeitig mit einer absoluten radialen Geschwindigkeitskomponente von $>0,1\text{m/s}$ erfasst werden. Zusätzlich sind Filteralgorithmen für die Verfolgung aller erkannten Objekte über die Zeit implementiert. Diese Verfolgungsalgorithmen sind in den Sensoren bereits integriert. Je nach gewählter Kommunikationsschnittstelle kann die Anzahl der detektierten Objekte begrenzt sein, z. B. bei Verwendung der RS485-Schnittstelle. Sowohl die Ziele als auch die Objekte werden nach Entfernung sortiert; diejenigen mit geringer Entfernung werden zuerst gemeldet. Das Ergebnis der Verfolgung ist eine Objektliste mit den folgenden Parametern:

- X-Position
- Y-Position
- Absolute Geschwindigkeit
- Richtungswinkel
- Länge
- Objekt-ID und mehr

Der Sensor meldet eine solche Liste aller verfolgten Objekte in jedem Messzyklus von typischerweise 50 oder 100 ms Länge. Eine zusätzliche Funktion ist die Trennung der Objekte in vordefinierten Bereichen, in denen viele Fahrzeuge auch dicht beieinanderstehen können. Dies ist zum Beispiel von Vorteil, wenn auf mehreren Fahrstreifen im dichtem Verkehr mit Staus, Stop-and-Go-Verkehr oder auch an Kreuzungen viele Fahrzeuge detektiert werden müssen.

2.3. Streckenband, Sensoraufbau und Integration

Die Auswahl des Autobahnabschnittes des Feldtests wurde in Abstimmung mit der technischen Projektbegleitung der ASFINAG getroffen. Dabei fokussiert man sich auf einen Autobahnabschnitt südlich von Graz, welcher bereits durch eine verdichtete Sensorik verfügt und damit im Zuge des Feldtests die Möglichkeit bietet, direkte Vergleiche der Sensorqualitäten und -möglichkeiten anzustellen. Die ASFINAG gestaltete jenen Abschnitt auf der A2 Süd Autobahn zu einer europaweit einzigartigen Teststrecke für das automatisierte Fahren (<https://www.alp-lab.at/> [Zugriff: 20.12.2021, 13:58]). Zwischen den Anschlussstellen Laßnitzhöhe, Graz-Ost und Graz-West wird im Echt-Betrieb getestet, wie sich selbstfahrende Autos im Straßenverkehr integrieren und wie Fahrzeuglenker auf solche Autos reagieren. In diesem Bereich wurde die Autobahn bereits mit modernster Sensorik (Fernbereichsradar, Videodetektion, Fahrzeugsensoren etc.) und zusätzlichen hochauflösenden Videokameras aufgerüstet, um wichtige Bewegungs- und Einzelfahrzeugdaten zu sammeln. Die Sensorik auf der Teststrecke umfasst HD-Videokameras mit Videodetektion, Verkehrssensoren zur spurbezogenen Erfassung von Einzelfahrzeugdaten (EFZ-Daten) mittels kombinierter Ultraschall-/Radar-/Infrarottechnologie und Fernbereichs-Radarsensoren zur Erfassung der einzelnen Fahrzeugpositionen im Erfassungsbereich. Mit der Einrichtung der Teststrecke verfolgt die ASFINAG unter anderem das Ziel, die digitale Infrastruktur zu testen. Mit der Fertigstellung der Teststrecke wurde die Basis geschaffen, um die vorhandenen Verkehrsdaten der digitalen Infrastruktur mit Fahrzeugdaten zusammenzuführen. Somit können die fusionierten Daten der Testfahrten in vielfältiger Weise analysiert und weiterverwendet werden.

Die im ausgewählten Testfeld existierenden Sensoren wurden in der Konzeption des Feldtests im Forschungsprojekt HEAt um die 10 neu zu testenden Smartmicro Radarsensoren der Produktlinie TRUGRD Stream erweitert. Dabei wurden die Sensoren auf Überkopfwegweiser im Kilometrierungsbereich der Autobahnstrecke der A2 183,948km bis 185,104km montiert, siehe nachstehende Abbildung zur Sensorübersicht. An insgesamt 5 Querschnitten wurden dabei jeweils 2 der neuen Radarsensoren vorgesehen, wobei die Ausrichtung der Radarsensoren sowohl mit als auch gegen die Fahrtrichtung festgelegt wurde, um hier die Datenqualität unterschiedlicher Aufstellungen innerhalb des Projektes testen und evaluieren zu können.

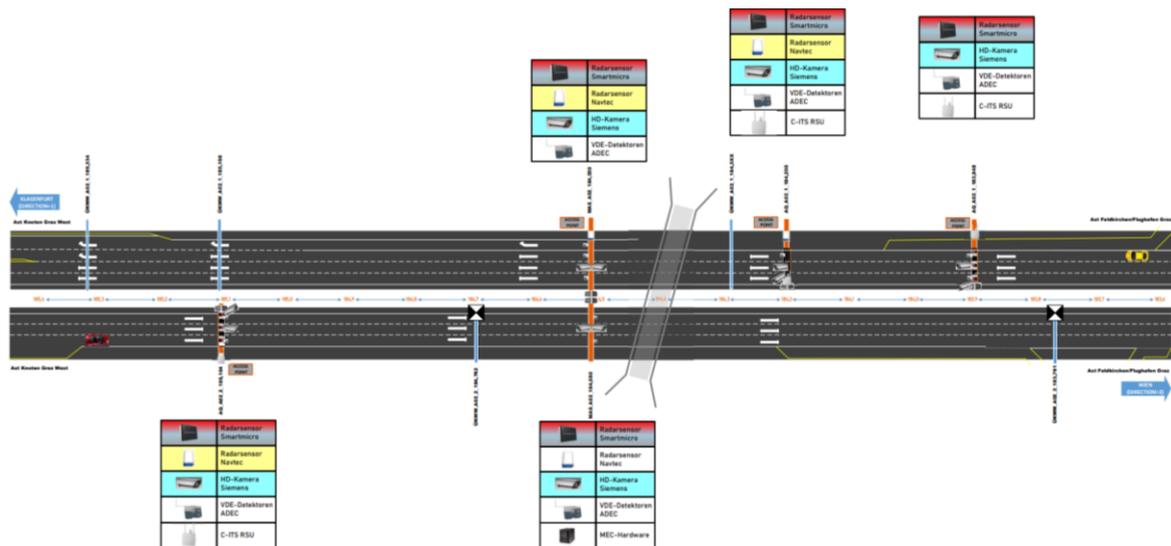


Abbildung 4: Streckenband mit Sensorübersicht

Das Streckenband und die Anordnung der neuen Radarsensoren wurde in der Konzeption des Feldtests genau abgestimmt, um unterschiedliche Detektionsbereiche im Zuge des Projektes HEAt testen zu können und bei der Parametrierung und Konfigurationseinstellungen der Sensoren unterschiedliche Parametersets projektbegleitend evaluieren zu können. Mit Hinblick auf die Analysen von segmentbezogenen Daten und daraus generierten Fahrzeugtrajektorien wurde eine Sensorausrichtung geplant, in welcher überlappende Detektions- und Handover-Bereiche eine durchgängige Analyse der Fahrlinien und Trajektorienplanungen einzelner Fahrzeuge ermöglicht.

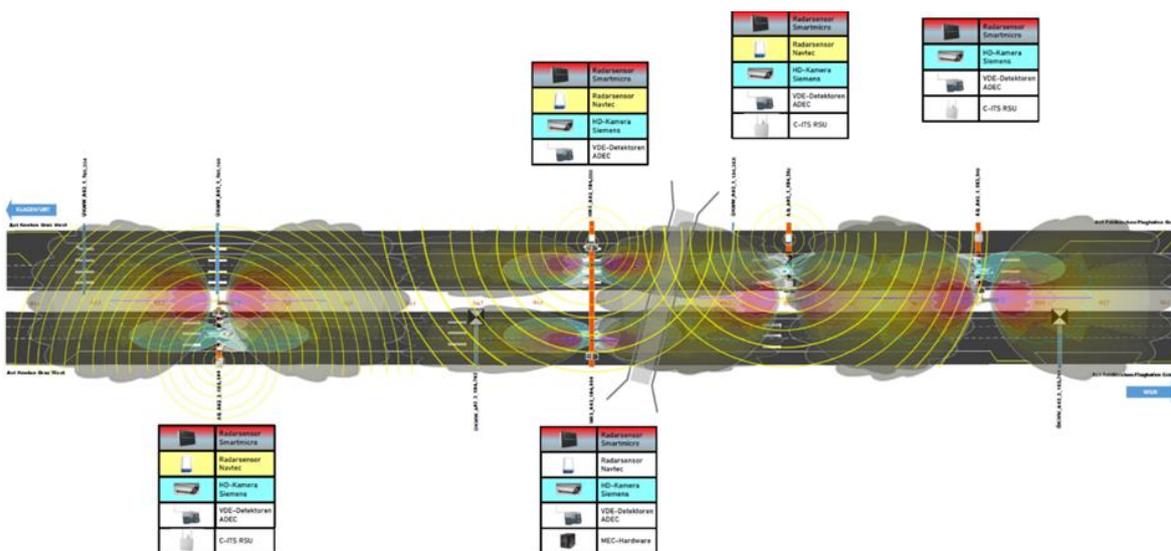


Abbildung 5: Streckenband mit Sensorausrichtung und schematischer Detektionsbereiche

Anhand der Smartmicro TMC Software (Traffic Management Configurator) wurden die Detektionsbereiche und Messquerschnitte der Smartmicro Radarsensoren konfiguriert, siehe Abbildung 6. Dabei lassen sich auch fahrstreifenfeine Detektionsbereiche festlegen. Näheres zur Software wird in Abschnitt 2.4 kurz erläutert.

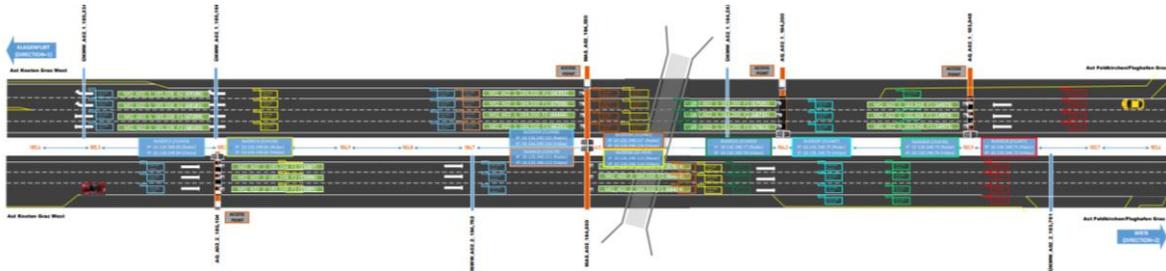


Abbildung 6: Streckenband Detektionsbereiche und Messquerschnitte

Der Feldtest wurde durch das Projektkonsortium wie beschrieben konzipiert. Zudem wurden, in Abstimmung mit der beauftragenden ASFINAG, auch ein Planer (FKH Ingenieurbüro GmbH) und ein Integrator (K.E.M. Montage GmbH) bei der Umsetzung des Feldtests miteingebunden. Damit konnten diverse Haftungs- und Gewährleistungspunkte bei der Montage der neuen Sensoren im Interesse der ASFINAG sichergestellt werden. Die Smartmicro Sensoren wurden in dem beschriebenen Testfeld auf der A2 aufgebaut und integriert. Die im Projekt HEAt angeschafften neuen Smartmicro Radarsensoren werden bei Beendigung des Projektes in den Besitz der ASFINAG übergehen.

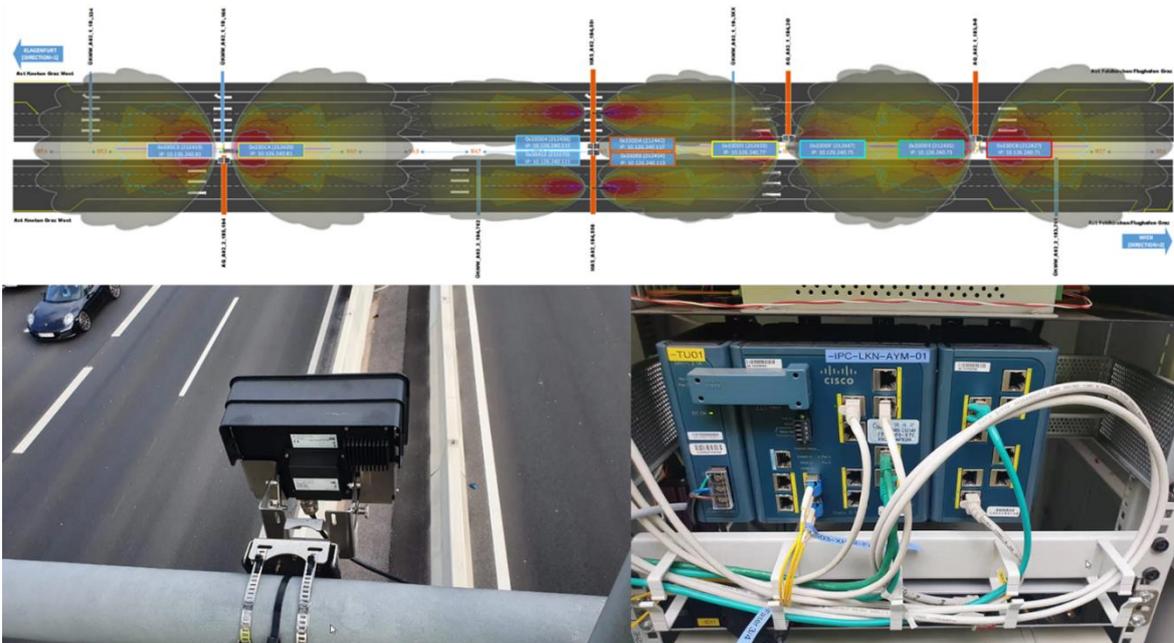


Abbildung 7: Sensoraufbau auf der ASFINAG Teststrecke Graz - A2 183,948km bis 185,104km

Für die Integration wurden 10 Sensoren auf der Strecke verwendet. Die Datensammlung basiert auf der zentralen (Test-)MongoDB (<https://www.mongodb.com/>) Datenbasis auf dem Testserver. Die geschriebene Applikation (geschrieben in der Programmiersprache C++) lief auf einem Windows Rechner. Der Rechner ist bei der Strecke verbaut, um die Netzwerkverspätung der Zeitstempel auf ein Minimum zu verkürzen, weil die Zeitstempel erst beim Eintreffen der Daten auf dem Rechner gesetzt werden. Die Firmware der Sensoren musste daher noch nachjustiert werden, um den Datenverlauf zu optimieren. Zukünftig wird die Applikation auf dem FND (Field Network Director) via Docker gehostet werden. Diesbezüglich gab es im Projekt folgende Teilaufgaben:

- Aufsetzen lokaler Test- und Entwicklungsumgebung mit lokalem Sensor, TMC und Simulationsdaten.
- Anbindung und Konfiguration der Smart_Access Library an die C++ Applikation.
- Integration MongoDB zum Speichern der Sensordaten.
- Testen und Anpassen der Software im Entwicklungszyklus nach Abstimmungen und Requirements.
- Deployment am ASFINAG Server und Anbindung an zentrale MongoDB für die Speicherung der Echtzeitdaten.

```
_id: ObjectId("60b0fa16f14400001c007fb2")
timestamp: 1622211094626
clientId: "212438"
xPoint1: "-71.016716"
yPoint1: "-53.120369"
headingDeg: "-2.466852"
objectLen: 4.599999904632568
speedAbs: "0.943396"
objectId: 0
```

Abbildung 8: Ein Eintragsbeispiel in der MongoDB

2.4. Smartmicro TMC - Traffic Management Configurator

Die innovativen Smartmicro Radarsensoren wurden zusätzlich softwareseitig durch einen Konfigurator (TMC -Traffic Management Configurator) ergänzt und ermöglichte hier die Erkenntnisse aus den Analysen in der Parametrierung und Konfiguration der einzelnen Sensoren zu berücksichtigen. Der TMC Konfigurator ist ein leistungsstarkes, grafisches, Windows-basiertes Tool zur Konfiguration und Überwachung der Daten der UMRR-Sensoren (Universal-Medium-Range-Radar-Sensoren) von Smartmicro. Zudem erleichtert das Tool auch die Protokollierung bei der Datenaufzeichnung.

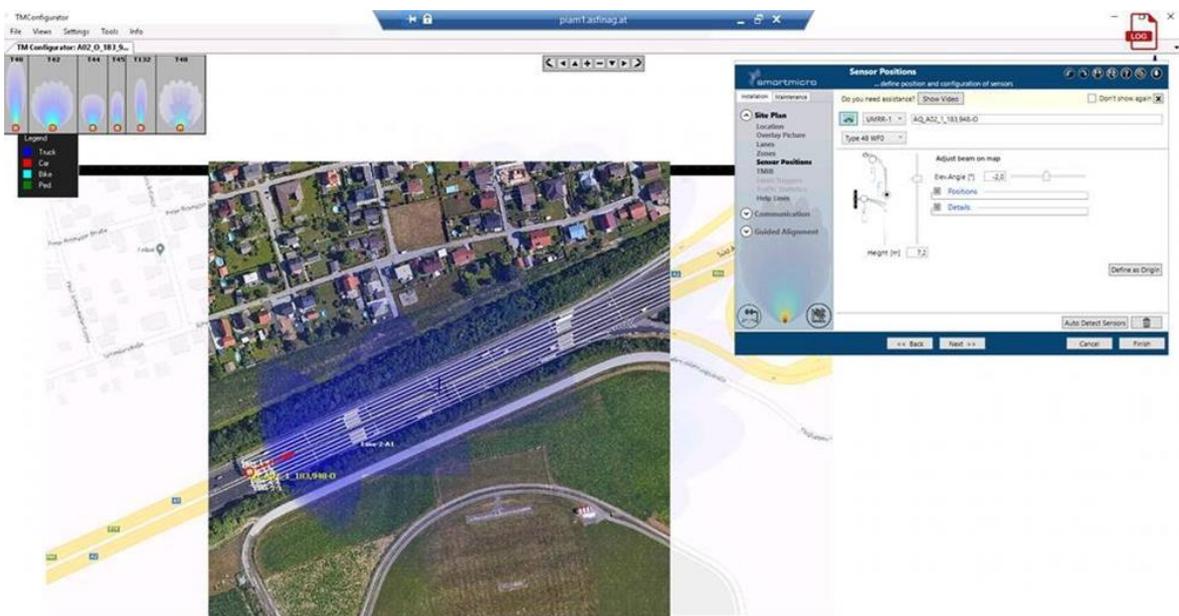


Abbildung 9: Smartmicro TMC (Traffic Management Configurator) Benutzeroberfläche

Die im HEAt-Testfeld aufgebauten und integrierten Smartmicro Radarsensoren wurden mittels des Traffic Management Configurators konfiguriert und parametrierung. Hierbei wurde in engem Kontakt mit der Firma Smartmicro auf bestehendem Know-How bei der Sensoreinstellung aufgebaut. Dennoch wurde es notwendig die Parametrierungseinstellungen auf die örtlichen Gegebenheiten genau abzustimmen. Zu diesem Zweck wurde ein iterativer Parametrierungsprozess im Zuge des Feldtests angestoßen. Dabei wurden Smartmicro Sensordaten auf deren Qualität hinsichtlich Fahrzeugerkennung, Fahrzeugklassifikation, Detektorbereich Optimierung, etc. überprüft und analysiert. Diese Analysen bildeten wertvolle Erkenntnisse bei den nächsten Parametrierungseinstellungen innerhalb der TMC Benutzeroberfläche und führten zu einer höheren Qualität der Sensordaten im Laufe des projektbegleitenden Feldtests. Diverse Analyse Diagramme werden in Abschnitt 2.7 näher erläutert und beschrieben.

2.5. Datengrundlage – Datensätze

Innerhalb des Forschungsprojektes HEAt standen unterschiedliche Datensätze zur Verfügung, welche in der Datenanalyse berücksichtigt wurden. Dabei bildeten die aus den neuen Smartmicro Radarsensoren stammenden Datensätze den Kern der Datenanalyse. Aus den Smartmicro Sensoren lassen sich unterschiedliche Datensätze auslesen, Einzelfahrzeugdaten (Per Vehicle Data), aggregierte Datensätze (Statistics Data) und einzelne Objekt-Daten (Object Data) mit welcher sich Fahrzeugtrajektorien rekonstruieren lassen. Zudem wurden als Referenzdaten bei der Qualitätsbeurteilung EFZ Einzelfahrzeugdaten verwendet, welche bei den Verkehrsstärkeanalysen als „Ground Truth“ mit den Smartmicro Daten verglichen wurden. Ebenfalls wurden Navtech-Radardaten zur Verfügung gestellt, um die Datenqualität und die Sensorreichweite der Smartmicro Daten einordnen zu können. Zusätzliche Videodaten wurden bei der Einstellung der Messquerschnitte und Detektionsbereiche auf einzelnen Fahrstreifen verwendet.

- Smartmicro Radardaten
 - Per Vehicle Data
 - Object Data
 - Statistics Data
- Einzelfahrzeugdaten - EFZ Data
- Navtech Radardaten
- Videodaten

Ziel des Projektes war es die Datenqualität der Smartmicro Radardaten zu evaluieren und insbesondere bei der Konfiguration und der Parametrierung der Sensoren, der Detektionsbereiche und der Messquerschnitte in einem iterativen Kalibrierungsprozess die Datenqualität nachhaltig zu verbessern. Im Zuge des Feldtests wurden somit Daten für 3 Werktage ausgewertet und analysiert, um Verbesserungsvorschläge liefern zu können und Fehlkonfigurationen der Sensoren offensichtlich zu machen. Die Analysen der Sensordaten erfolgten für folgende 3 Werktage und deren Ergebnisse werden in Abschnitt 2.7 näher betrachtet und beschrieben.

- 29.09.2021
- 18.11.2021
- 30.11.2021

Die Analysen der Smartmicro Radardaten stützen sich auf die 3 Datensätze Per Vehicle Data, Object Data und Statistics Data. Gerade bei der Fahrzeuergreifung und -klassifikation stützen sich die in Abschnitt 2.7 näher beschriebenen Ergebnisse und Analysen auf den fahstreifenfeinen „Per Vehicle Data“ Datensatz. Bei den in Abschnitt 2.8 beschriebenen Analyseansätzen bezüglich der Trajektoriengenerierung und -erkennung wurden insbesondere der „Object Data“ Datensatz für die Analysen herangezogen. Der Aufbau und die zugehörigen Attribute der unterschiedlichen Datensätze wird nachstehend dargestellt.

```

root
|-- docid: string (nullable = true)
|-- locationName: string (nullable = true)
|-- timestamp: timestamp (nullable = true)
|-- clientId: integer (nullable = true)
|-- genericHeader_portId: integer (nullable = true)
|-- genericHeader_portVersionMajor: integer (nullable = true)
|-- genericHeader_portVersionMinor: integer (nullable = true)
|-- genericHeader_portTimestamp: long (nullable = true)
|-- genericHeader_portSize: integer (nullable = true)
|-- genericHeader_bodyEndianness: integer (nullable = true)
|-- genericHeader_portIndex: integer (nullable = true)
|-- genericHeader_headerVersionMajor: integer (nullable = true)
|-- genericHeader_headerVersionMinor: integer (nullable = true)
|-- staticHeader_numberOfObjects: string (nullable = true)
|-- staticHeader_cycleDuration: string (nullable = true)
|-- pvrts_objctid: string (nullable = true)
|-- pvrts_class: integer (nullable = true)
|-- pvrts_zone: integer (nullable = true)
|-- pvrts_countedObject: integer (nullable = true)
|-- pvrts_speed: double (nullable = true)
|-- pvrts_heading: double (nullable = true)
|-- pvrts_length: string (nullable = true)

```

Abbildung 10: Aufbau und Attribute des Smartmicro „Per Vehicle“ Datensatz.

```

root
|-- docid: string (nullable = true)
|-- locationName: string (nullable = true)
|-- timestamp: timestamp (nullable = true)
|-- clientId: integer (nullable = true)
|-- genericHeader_portId: integer (nullable = true)
|-- genericHeader_portVersionMajor: integer (nullable = true)
|-- genericHeader_portVersionMinor: integer (nullable = true)
|-- genericHeader_portTimestamp: long (nullable = true)
|-- genericHeader_portSize: integer (nullable = true)
|-- genericHeader_bodyEndianness: integer (nullable = true)
|-- genericHeader_portIndex: integer (nullable = true)
|-- genericHeader_headerVersionMajor: integer (nullable = true)
|-- genericHeader_headerVersionMinor: integer (nullable = true)
|-- staticHeader_numberOfZones: integer (nullable = true)
|-- staticHeader_numberOfClasses: integer (nullable = true)
|-- staticHeader_statusBits: integer (nullable = true)
|-- staticHeader_activeFeatures: integer (nullable = true)
|-- staticHeader_failsafeFlags: integer (nullable = true)
|-- staticHeader_milliseconds: integer (nullable = true)
|-- staticHeader_outputType: integer (nullable = true)
|-- staticHeader_outputFormatVersion: integer (nullable = true)
|-- staticHeader_frameId: integer (nullable = true)
|-- staticHeader_unixSeconds: integer (nullable = true)
|-- staticHeader_reserved: integer (nullable = true)
|-- staticHeader_sro2Version: integer (nullable = true)
|-- staticHeader_intervalCountdown: integer (nullable = true)
|-- staticHeader_intervalTime: integer (nullable = true)
|-- staticHeader_sensorSerial: integer (nullable = true)
|-- staticHeader_numberOfStatistics: integer (nullable = true)
|-- statistics_messageIdx: integer (nullable = true)
|-- statistics_zoneNumber: integer (nullable = true)
|-- statistics_class: integer (nullable = true)
|-- statistics_statisticOutput1: string (nullable = true)
|-- statistics_mode: integer (nullable = true)
|-- statistics_reserved2: string (nullable = true)

```

Abbildung 11: Aufbau und Attribute des Smartmicro „Statistics“ Datensatz.

```

root
|-- docid: string (nullable = true)
|-- locationName: string (nullable = true)
|-- timestamp: timestamp (nullable = true)
|-- clientId: integer (nullable = true)
|-- genericHeader_portId: integer (nullable = true)
|-- genericHeader_portVersionMajor: integer (nullable = true)
|-- genericHeader_portVersionMinor: integer (nullable = true)
|-- genericHeader_portTimestamp: long (nullable = true)
|-- genericHeader_portSize: integer (nullable = true)
|-- genericHeader_bodyEndianness: integer (nullable = true)
|-- genericHeader_portIndex: integer (nullable = true)
|-- genericHeader_headerVersionMajor: integer (nullable = true)
|-- genericHeader_headerVersionMinor: integer (nullable = true)
|-- staticHeader_numberOfObjects: integer (nullable = true)
|-- staticHeader_cycleDuration: double (nullable = true)
|-- object_xPointFront: double (nullable = true)
|-- object_yPointFront: double (nullable = true)
|-- object_xPointFacing: double (nullable = true)
|-- object_yPointFacing: double (nullable = true)
|-- object_height: integer (nullable = true)
|-- object_speedAbs: double (nullable = true)
|-- object_headingDeg: double (nullable = true)
|-- object_objectLen: double (nullable = true)
|-- object_mileage: double (nullable = true)
|-- object_quality: double (nullable = true)
|-- object_acceleration: integer (nullable = true)
|-- object_onZone: integer (nullable = true)
|-- object_wgsLongFrontFacing: double (nullable = true)
|-- object_wgsLatFrontFacing: double (nullable = true)
|-- object_wgsLongFacing: double (nullable = true)
|-- object_wgsLatFacing: double (nullable = true)
|-- object_objectId: integer (nullable = true)
|-- object_objectClass: integer (nullable = true)
|-- object_objectStatusFlag: integer (nullable = true)
|-- object_closestLane: integer (nullable = true)
|-- object_cyclesSinceLastUpdate: string (nullable = true)

```

Abbildung 12: Aufbau und Attribute des Smartmicro „Object data“ Datensatz.

2.6. Datenbank und Analysemodule

Der Feldtest wurde über einen Zeitraum von mehreren Monaten begleitet und kontinuierliche Analysen ermöglichten eine Verbesserung der Parametrierung und Konfiguration der im Projekt HEAT zu testenden Smartmicro Radarsensoren. Dabei wurden Datensätze einzelner Messtage in der die Hadoop-Datenbank importiert, um diese mit den Analyse-Modulen aufbereiten und auswerten zu können. Die durch die Analysen der grafischen Diagramme und statistischen Kennwerte erzielten Erkenntnisse wurden durch Sensoradaptierungen und -verbesserungen berücksichtigt. Ein wichtiger Punkt bei der Einbindung der Smartmicro Sensordaten war auch die Datenverarbeitung und Übertragung, um die Daten in der MongoDB speichern zu können. Dabei wurde besonderer Fokus auch auf die Zeitsynchronisation bei der Datenübertragung geachtet und eine möglichst geringe Latenzzeit bei der Datenübertragung avisiert.

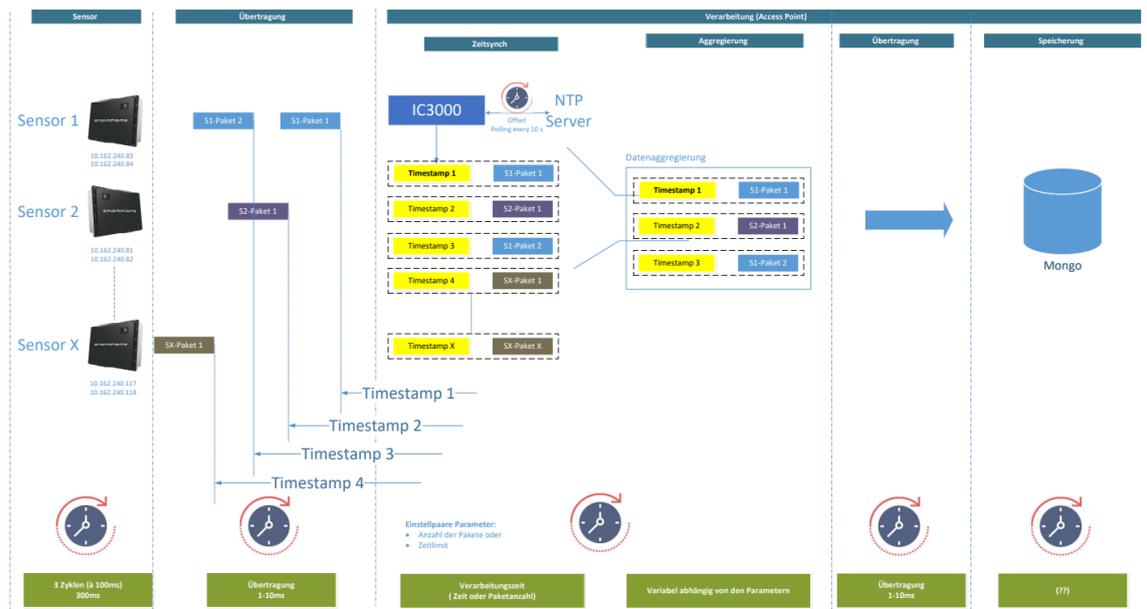


Abbildung 13: Systemarchitektur Datenverarbeitung und -speicherung in der MongoDB

Das Datenbankmodul stützt sich auf ein umfangreiches bestehendes Hadoop-Cluster. Zur Erhebung und Prüfung der Datenqualität wurde eine betriebsbereite Datenbank in einer „Big Data“ Umgebung auf Basis von Hadoop und MongoDB verwendet. Anschließend wurden umfangreiche in Python geschriebene Datenanalysen erstellt, um die gesammelten Daten zu extrahieren und zu verarbeiten. Diese Python-Skripte wurden auch der ASFINAG mit Beendigung des Projektes für deren weitere Nutzbarkeit übergeben. Diese im Projekt HEAT entwickelte Qualitätsbewertung bildet die Grundlage für den weiteren Einsatz der neuer Smartmicro Radarsensoren im Straßennetz der ASFINAG in der Zukunft.

Der Prozess der Datenanalyse folgte einem iterativen Schema. Wie in gängigen Frameworks üblich, begannen die Datenanalyseprozesse aufgrund des hohen Datenvolumens mit ersten explorativen Datenprüfungen und Vorverarbeitung/Aggregation. Aus algorithmischer Sicht wurde der Code hauptsächlich in SCALA geschrieben, da er schnell ausgeführt werden kann und nativ in der Hadoop/Big-Data-Umgebung, der von der ASFINAG für dieses Projekt bereitgestellten Hardwarelösung, läuft. Die detaillierte Analyse der aggregierten Daten wurde in Python (v3.7.10, www.python.org) und Jupyter Notebooks (<https://jupyter.org/>) durchgeführt. Für die statistische Modellierung und Datenmanipulation wurden folgende Bibliotheken verwendet: scikit-learn [Pedregosa et al., 2011], pandas [McKinney et al., 2010]. Zur Erstellung von Visualisierungen wurden die Bibliotheken matplotlib [Hunter et al., 2007] und seaborn [Waskom et al., 2017] verwendet.

Der Arbeitsablauf der Datenanalyse wurde wie folgt gestaltet:

1. Die Datenformate/Kodierungen für alle Datensätze wurden überprüft (EFZ, Smartmicro, Navtech) und über gefundene Unregelmäßigkeiten berichtet.
2. Für jeden einzelnen Datensatz wurden mehrere Runden von Plausibilitätsprüfungen durchgeführt, z.B.:
 - a. Sind die Blickwinkel der erkannten Objekte regelmäßig?
 - b. Entsprechen die vorliegenden Daten den Spezifikationen, d. h. stimmen die Längen in den Daten und die zugewiesenen Fahrzeugklassen mit der Spezifikation überein?
 - c. Erfassen die Sensoren die richtige Richtung bzw. gibt es aussagekräftige Daten für jede Fahrspur, die ein Sensor erfassen sollte?
3. Es wurde ein Mapping der verschiedenen Datensätze erstellt, um sie vergleichbar zu machen und an gemeinsamen Identifikatoren auszurichten. (Richtung, Fahrstreifenzuordnung, aggregierte Klassifizierung der Fahrzeugklassen in PKW-ähnlich und LKW-ähnlich, etc.)
4. Die Datensätze wurden verglichen (EFZ-Daten, Videodaten, Navtech-Radardaten und Smartmicro -Radardaten), wobei der Fokus auf Smartmicro - und EFZ-Daten lag, wobei die EFZ-Daten als Referenz dienten, welche die „Ground Truth“ abbildeten.

Zum Zweck der Analyse wurden 10 Smartmicro-Sensoren an 4 verschiedenen Orten (Kilometern) angebracht. Jeder Kilometer hat unterschiedliche Hardware-Setups und

Einstellungen. Das Hauptziel war es, den Aufbau und die Qualität der Smartmicro-Sensoren zu überprüfen und zu verstehen, ob sie korrekt installiert wurden und ob die erhaltenen Daten im Vergleich zu bestehenden Verkehrserkennungssystemen von zufriedenstellender Qualität sind. Ein wichtiger Schritt auf dem Weg zur Lösung war das Verständnis der "richtigen" Platzierung (Sensor-ID auf den Spezifikationen vs. physisch korrekt platziert), der Richtung und des Abdeckungsbereichs der Sensoren. Bei der Überprüfung des Erfassungsbereichs lag der Schwerpunkt auf den Fahrspureinstellungen (wie weit ein bestimmter Fahrstreifen von einem Sensor erfasst werden kann) und der Erfassungslänge (wie weit ein Sensor reichen kann, um ein Objekt weiterhin zu erfassen).

Für den Qualitätscheck wurden die Daten von EFZ als Basis genommen (auch wenn die Qualität an sich begrenzt ist, was zu Fehlern in der Analyse führen kann). Für den Vergleich mit den Referenzwerten aus EFZ wurden folgende Qualitätskriterien geprüft:

1. die Anzahl der Objekte, die jeder Sensor in jeder Periode erfassen kann
2. die Geschwindigkeit der einzelnen Objekte
3. Art des Objekts (PKW, LKW)

Die Qualitätsprüfung und -analyse wurde nach jeder Einstellungskorrektur (Hardwarewechsel) und Softwareaktualisierung wiederholt. Insgesamt gab es 5 Iterationen mit verschiedenen Daten, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten erhoben wurden. Bei jeder Änderung wurde die Datenanalyse wiederholt, um die Qualität der Sensoren zu überprüfen. Detaillierte Diagramme und Auswertungen zu einer Auswahl an Datenanalysen sind in Abschnitt 2.7 beschrieben.

Eine erwähnenswerte Herausforderung im Projekt war, dass die Smartmicro-Sensoren eine bestimmte Anzahl von Fahrzeugen erkennen können, die durch sogenannte "Objekt-IDs" eindeutig identifiziert werden. Nach einer bestimmten unbekanntem Zeitspanne werden die "Objekt-IDs" neuen Fahrzeugen zugewiesen, was die Zählung der Anzahl der Fahrzeuge erschwert. Das Problem wurde durch die Entwicklung eines Algorithmus gelöst, der die Zeitspannen für die eindeutige Identifizierung von Fahrzeugen für jede Richtung und für jeden Sensor optimiert.

2.7. Datenanalyse

Folgende Auswertungen wurden anhand der im Projekt HEAt erhobenen Datensätze des Feldtests im Analysemodul über Python-Skripte behandelt, um die Qualität der Erfassung des Verkehrsgeschehens durch die neuen Smartmicro Radarsensoren bewerten zu können und Details zu den einzelnen Auswertungen sind den nachfolgenden Unterabschnitten zu entnehmen.

- Querschnittsdaten (Verkehrsstärke, Fahrzeugklassen, Geschwindigkeit, Nettozeitlücke, Fahrzeuglänge)
- Fahrzeugklassifikation in maximal 9 Fahrzeugklassen
- Verkehrsstärke- und Geschwindigkeitsganglinien unterschiedlicher Fahrzeugklassen
- Verkehrsstärkeganglinien-Vergleich zwischen Smartmicro Radardaten vs. EFZ Einzelfahrzeug-Datensatz als Referenzdaten
- Geschwindigkeitsverteilungen und -histogramme
- Fundamentaldiagramm-Darstellung
- Sensorreichweitenanalyse
- Trajektorienanalyse

2.7.1. Verkehrsstärkeauswertungen

Die Zählung von Fahrzeugen und die Erhebung der Verkehrsstärke an definierten Messquerschnitten ist eine der zentralsten verkehrlichen Kennwerte, um das Verkehrsgeschehen und den Verkehrszustand beschreiben zu können. Aus dem Smartmicro „Per Vehicle Data“ Datensatz ließen sich für die 10 im Testfeld aufgebauten Smartmicro Radarsensoren die Verkehrsstärken fahstreifenfein ermitteln. Folgende Abbildung zeigt hier die Übersicht der Verkehrsstärken für die 3 Erhebungstage (29.09.2021, 16.11.2021 und 30.11.2021) für beide Fahrrichtungen, wobei die Fahrtrichtung 1 in Richtung Westen Klagenfurt (Direction 1) und die Fahrtrichtung 2 in Richtung Osten Wien (Direction 2) verläuft. Nicht alle Sensorquerschnitte verfügen über 4 Fahstreifen, weswegen einige Tabelleneinträge keine Werte aufweisen (NaN). Zudem lassen sich auch auf einen Blick Probleme bei der Erfassung an einzelnen Radarsensoren erkennen. So weist der Radarsensor 212435 in Fahrtrichtung Wien (Direction 2) eine unrealistisch geringe Verkehrsstärke am 30.11.2021 auf. Durch den COVID-19 bedingten Teil-Lockdown Ende November 2021, erkennt man auch, dass die absoluten Verkehrsstärken an diesem Erhebungstag geringer war als an den anderen Erhebungstagen.

Direction 1

clientId	212419	212420	215570	212436	212454	212442	212433	212447	212435	212427	
date	Projected_Lane										
2021-09-29	1.0	8500.0	8525.0	9047.0	8457.0	3405.0	3743.0	NaN	NaN	NaN	8444.0
	2.0	12071.0	10873.0	13631.0	12982.0	17516.0	18521.0	20143.0	NaN	19258.0	16129.0
	3.0	11086.0	10086.0	12395.0	11537.0	12116.0	13496.0	14834.0	NaN	13758.0	16269.0
	4.0	3814.0	3248.0	4263.0	3820.0	4026.0	4669.0	5325.0	NaN	4997.0	NaN
2021-11-18	1.0	9746.0	8794.0	9881.0	9687.0	5831.0	4425.0	NaN	NaN	NaN	8665.0
	2.0	12723.0	11927.0	13459.0	13224.0	16924.0	18580.0	20808.0	21654.0	19327.0	16667.0
	3.0	10448.0	10400.0	11808.0	11546.0	12245.0	13030.0	13242.0	13496.0	13333.0	16756.0
	4.0	2872.0	2987.0	3488.0	3269.0	3700.0	3901.0	4269.0	4010.0	4640.0	NaN
2021-11-30	1.0	8286.0	7538.0	8379.0	8418.0	5052.0	3459.0	NaN	NaN	NaN	22139.0
	2.0	11413.0	10538.0	12168.0	12138.0	15314.0	17365.0	18701.0	19687.0	12108.0	14487.0
	3.0	10236.0	10093.0	11210.0	11066.0	11494.0	12376.0	11974.0	12116.0	18390.0	3.0
	4.0	2680.0	2748.0	3025.0	2922.0	3066.0	3388.0	3529.0	3243.0	792.0	NaN

Direction 2

clientId	212419	212420	215570	212436	212454	212442	212433	212447	212435	212427	
date	Projected_Lane										
2021-09-29	1.0	NaN	3282.0								
	2.0	17664.0	17216.0	17753.0	16556.0	15415.0	16305.0	17158.0	15885.0	NaN	15759.0
	3.0	12289.0	13997.0	16550.0	14338.0	15620.0	17511.0	17303.0	17698.0	NaN	16365.0
	4.0	4752.0	5192.0	5858.0	4933.0	5063.0	5777.0	6032.0	6386.0	NaN	4530.0
2021-11-18	1.0	NaN	16844.0								
	2.0	10550.0	14310.0	16778.0	16116.0	16345.0	16497.0	17386.0	15463.0	21161.0	15486.0
	3.0	18154.0	14821.0	15808.0	14747.0	15353.0	15423.0	16082.0	15455.0	11165.0	4665.0
	4.0	7501.0	7558.0	6413.0	5916.0	5701.0	5809.0	5640.0	7328.0	278.0	4.0
2021-11-30	1.0	NaN	268.0								
	2.0	10222.0	13041.0	14970.0	14599.0	14689.0	14985.0	15325.0	13675.0	192.0	15230.0
	3.0	15695.0	12815.0	13448.0	12760.0	13070.0	13184.0	13384.0	13230.0	3679.0	3458.0
	4.0	5859.0	5816.0	4794.0	4519.0	4281.0	4341.0	4210.0	5524.0	8582.0	12906.0

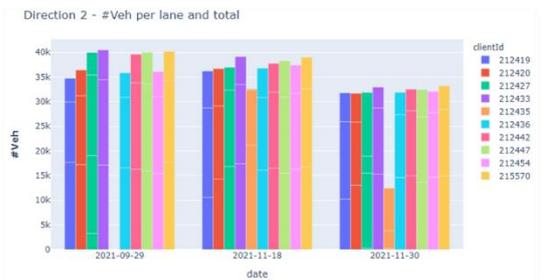
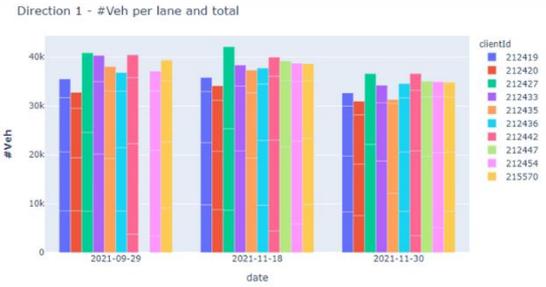


Abbildung 14: Fahrstreifenfeine Verkehrsstärke aus Smartmicro „Per Vehicle Data“ Datensatz – Fahrstreifenfeiner Gesamtüberblick

Nachfolgendes Diagramm vergleicht die Verkehrsstärken des Smartmicro „Per Vehicle Data“ und „Statistics Data“ Datensatz des Erhebungstages 30.11.2021 anhand einer Verteilungsfunktion. Die Abweichungen der Verkehrsstärken im 15min Intervall betragen maximal 24 Fahrzeuge und rund 26% der Datensätze weisen exakt die identen Verkehrsstärken auf.

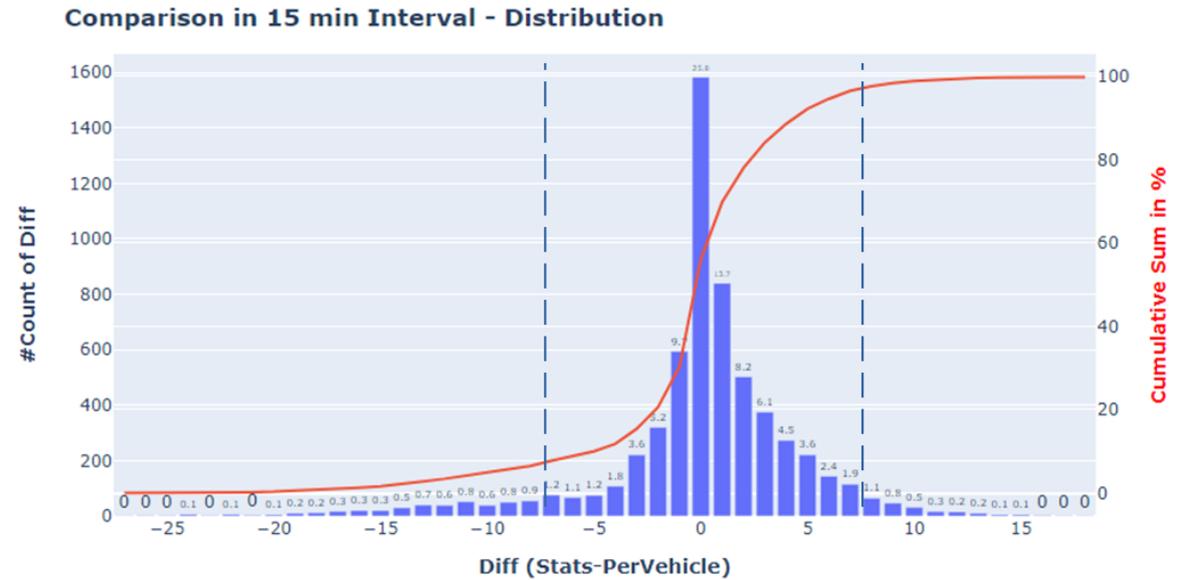
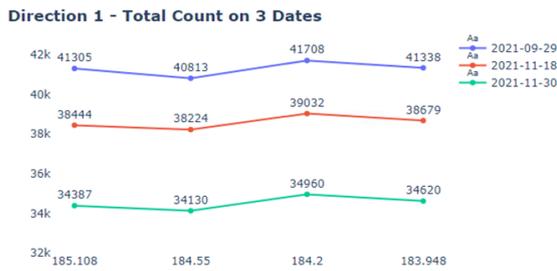


Abbildung 15: Verkehrsstärkevergleich zwischen „Per Vehicle Data“ und „Statistics Data“ – 30.11.2021 – 15min Intervall

In nachstehenden Abbildungen werden die Tagesverkehrsstärken getrennt nach Fahrtrichtung der Verkehrstage 29.09.2021, 16.11.2021 und 30.11.2021 auf der linken Seite in absoluten Zahlen angegeben. Auch hier lassen sich die geringeren Verkehrsstärken durch den Teil-Lockdown am 30.11.2021 erkennen. Auf der x-Achse ist hierbei die Kilometrierung der Montagequerschnitte an den Überkopfwegweisern angegeben. Der rechte Teil der Abbildungen zeigt die relativen Prozentwerte bezogen auf 100%, welche am Kilometrierungsquerschnitt 184,55km liegt. Da in diesem Bereich keine Auf- und Abfahrten auf dem Autobahnstreckenabschnitt liegen, sollten die Abweichungen an den Messquerschnitten möglichst gering sein. In Fahrtrichtung Klagenfurt (Direction 1) weisen die Querschnittswerte eine bessere Übereinstimmung auf als in Fahrtrichtung Wien (Direction 2), wo zwischen den Querschnitten eine Differenz der Verkehrsstärken von bis zu 6% detektiert wurden.

Absolute Numbers View



Absolute Numbers + Percentage

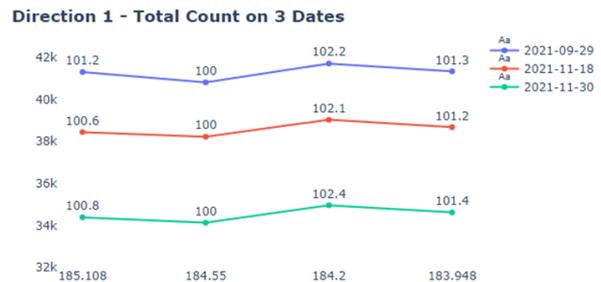
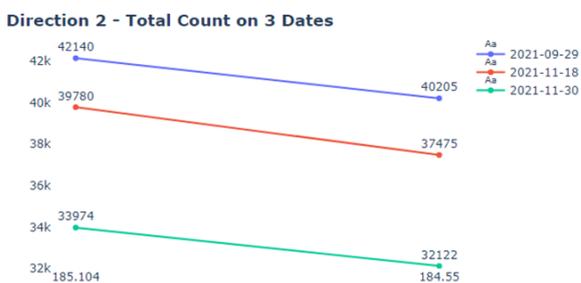


Abbildung 16: Verkehrsstärkevergleich zwischen Messquerschnitten anhand „Per Vehicle Data“ Fahrtrichtung Klagenfurt

Absolute Numbers View



Absolute Numbers + Percentage



Abbildung 17: Verkehrsstärkevergleich zwischen Messquerschnitten anhand „Per Vehicle Data“ Fahrtrichtung Wien

2.7.2. Fahrzeugklassifikation

Wichtig bei der Beurteilung der neuen Smartmicro Radarsensoren war auch die Güte und Qualität der Fahrzeugklassifikation. Im Smartmicro „Per Vehicle Data“ Datensatz werden 9 Fahrzeugklassen unterschieden. Folgende Abbildung zeigt die Verkehrsstärken und prozentuelle Aufteilungen der Fahrzeugklassen für die Verkehrstage 29.09.2021, 16.11.2021 und 30.11.2021 in aggregierter Form.

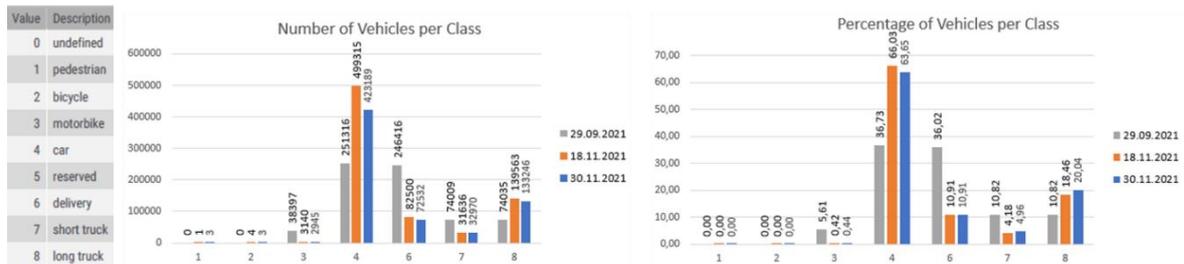


Abbildung 18: Fahrzeugklassifizierung für 9 Fahrzeugklassen anhand „Per Vehicle Data“

Häufig werden die Fahrzeugklassen lediglich in PKW-ähnliche und LKW-ähnliche Fahrzeuge unterschieden. Somit wurde auch hier eine Zusammenfassung der Fahrzeugklassen vorgenommen. In weiterer Folge werden die Ergebnisse weitgehend für die 2 aggregierten Fahrzeugklassen angegeben.

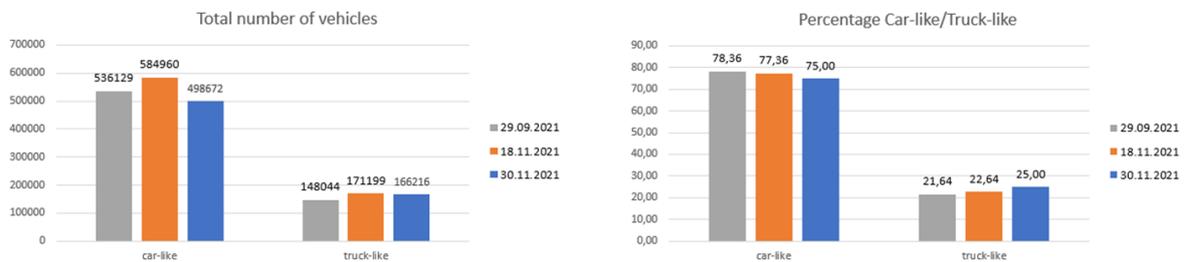


Abbildung 19: Fahrzeugklassifizierung PKW und LKW anhand „Per Vehicle Data“

Dem des „Per Vehicle Data“ Datensatz können auch die Längenverteilungen der detektierten Fahrzeuge ausgegeben und ausgewertet werden. Folgende Abbildung zeigt die Längenverteilung, wobei innerhalb des Projektes keine Referenzdaten zur Verfügung standen um diese Zahlen und Längenverteilungen zu verifizieren und bewerten zu können.

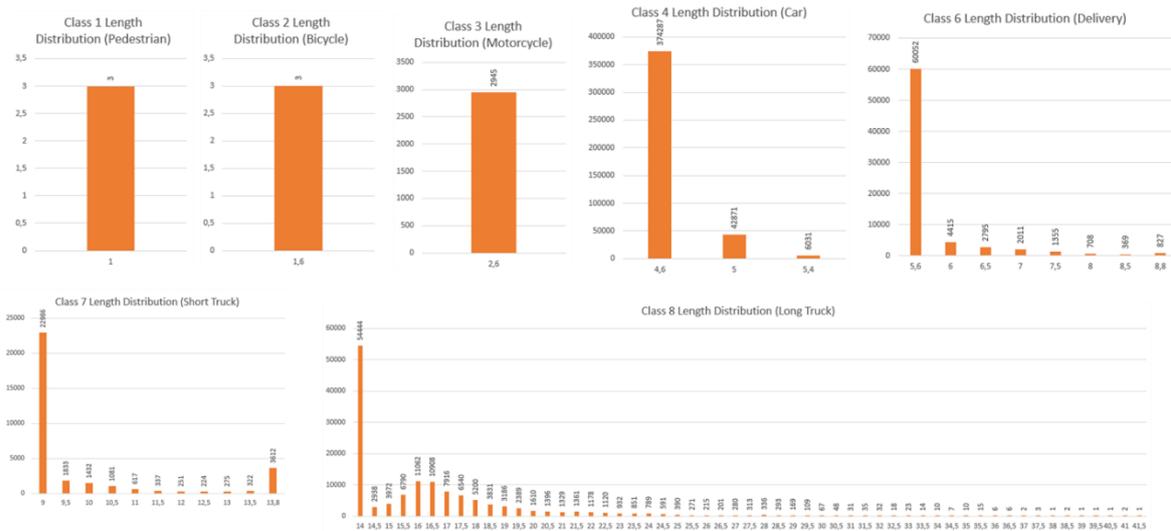


Abbildung 20: Längenverteilung der Fahrzeugklassen aus dem „Per Vehicle Data“ Datensatz

2.7.3. Verkehrsstärke- und Geschwindigkeitsganglinien unterschiedlicher Fahrzeugklassen

In nachfolgender Abbildung wurden aus den Verkehrsstärken im 15min Intervall Verkehrsstärkeganglinien für beide Fahrtrichtung getrennt und für alle 10 Smartmicro Radarsensoren für den Erhebungstag 30.11.2021 erstellt. In Fahrtrichtung Klagenfurt (Direction 1) auf der linken Seite der Abbildung lässt sich eine tendenziell stärkere Nachmittagsspitze erkennen, wohingegen in Fahrtrichtung Wien (Direction 2) ein ausgeprägtere Morgenspitze ersichtlich wird. Diese Abbildung gilt für den Gesamtverkehr und unterscheidet nicht zwischen dem PKW- und LKW-Verkehr.



Abbildung 21: Gesamtverkehr Verkehrsstärkeganglinien Smartmicro „Per Vehicle Data“ Datensatz 30.11.2021

Die Trennung zwischen PKW- und LKW-Verkehr lässt sich nachstehend analysieren. Dabei wird offensichtlich, dass die Morgen- und Nachmittagsspitze aufgrund der PKW-Zahlen

entstehen. Der LKW-Verkehr ist über den Tag im Zeitbereich zwischen 6Uhr bis etwa 17Uhr relativ konstant.

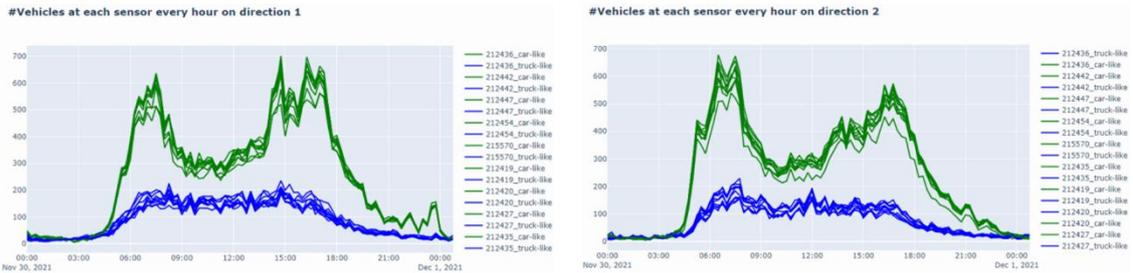


Abbildung 22: PKW und LKW Verkehrsstärke Ganglinien Smartmicro „Per Vehicle Data“ Datensatz 30.11.2021

Aus dem Smartmicro „Per Vehicle Data“ Datensatz lassen sich neben der Verkehrsstärke auch die Fahrzeuggeschwindigkeiten aufbereiten und analysieren. Folgende Abbildung zeigt die Geschwindigkeitsganglinien im 15min Intervall für beide Fahrtrichtung und für PKW und LKW getrennt für alle 10 Smartmicro Radarsensoren für den Erhebungstag 30.11.2021. Die Streuung der Geschwindigkeitswerte in Fahrtrichtung Wien (Direction 2) auf der rechten Diagrammseite sind dabei höher als in Fahrtrichtung Klagenfurt (Direction 1) auf der linken Diagrammseite. Insbesondere in Fahrtrichtung Klagenfurt lässt sich auch eine höhere Geschwindigkeit in den Nachtstunden feststellen.

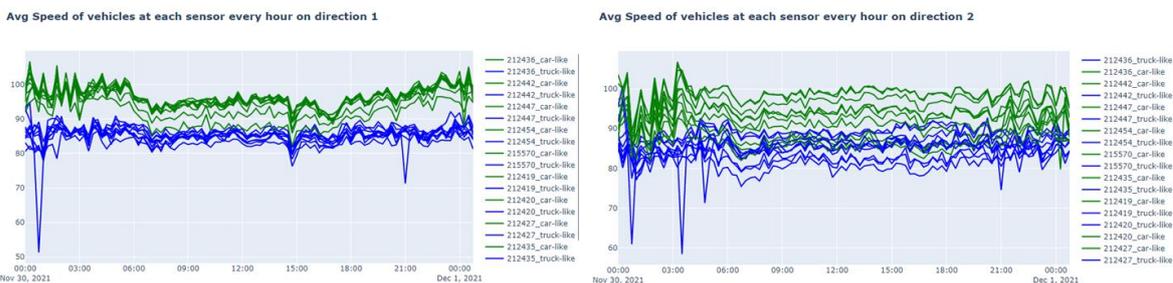


Abbildung 23: PKW und LKW Geschwindigkeitsganglinien Smartmicro „Per Vehicle Data“ Datensatz 30.11.2021

Zur besseren Analysierbarkeit wurden die Ganglinien auch getrennt für die einzelnen Radarsensoren aufbereitet, um darauf basierend Rückschlüsse über die Datenqualität der einzelnen Sensordaten im iterativen Parametrierungsprozess ziehen zu können. Nachfolgende Abbildung zeigt hier exemplarisch die gesammelten Ergebnisse der

Verkehrsstärke- und Geschwindigkeitsganglinien für die Fahrtrichtung Klagenfurt für den Verkehrstag 30.11.2021. Dabei werden auch die Verkehrsstärken und Geschwindigkeitswerte für die Fahrzeugklassen PKW und LKW und für die einzelnen Fahrstreifen gesondert aufgetragen. Weitere Detailergebnisse sind im Anhang in Kapitel 5 dargestellt.

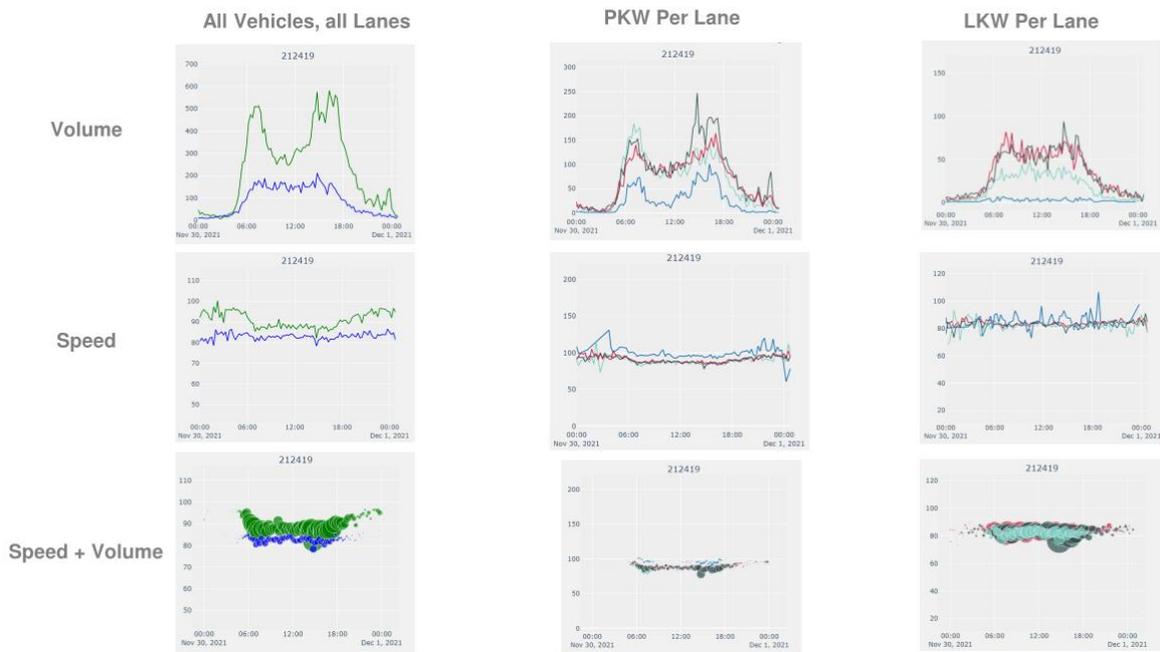


Abbildung 24: Verkehrsstärke- und Geschwindigkeitsganglinien unterschiedlicher Fahrzeugklassen Sensor 212419 Fahrtrichtung Klagenfurt – 30.11.2021

2.7.4. Verkehrsstärkeganglinien-Vergleich zwischen Smartmicro Radardaten vs. Einzelfahrzeug-Datensatz

Die zentralste Auswertung und Analyse bei der Qualitätsbeurteilung der Smartmicro Radarsensoren war der Vergleich der Verkehrsstärkeganglinien der Smartmicro Radardaten mit den EFZ-Referenzdaten der Einzelfahrzeugdaten. Hierbei wurden die Sensorbereiche der zwei unterschiedlichen Sensorsysteme aufeinander abgestimmt, um einen Datenvergleich zu ermöglichen. Die am nächsten liegenden Sensoren, die in die gleiche Richtung zeigen, wurden dabei verglichen. Somit wurden die Datensätze der Smartmicro Sensoren 212419, 212433 und 212436 für die Fahrtrichtung Klagenfurt (Direction 1) sowie 212420 und 212454 Fahrtrichtung Wien (Direction 2) im Vergleich mit den EFZ-Referenzdaten der Einzelfahrzeugdaten berücksichtigt. Nachfolgende Abbildung zeigt die grafische Gegenüberstellung der Verkehrsstärkeganglinien dieser 5 Detektionsbereiche für den 30.11.2021.

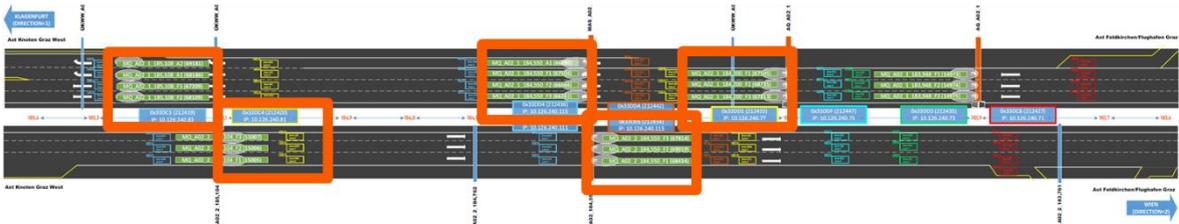
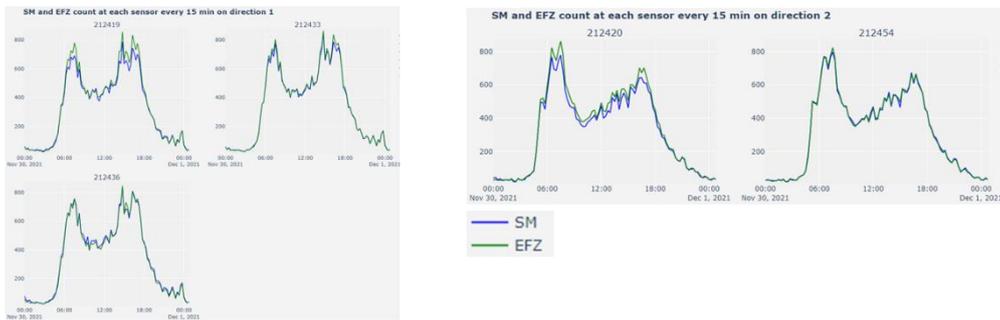


Abbildung 25: Verkehrsstärke Ganglinien Vergleich Smartmicro Radardaten vs. Einzelfahrzeug-Datensatz – 30.11.2021

Um diesen Vergleich offensichtlicher bewerten zu können, wurde zudem eine Gangliniendifferenzdarstellung aufbereitet. Hier wird deutlich, dass zwar die größten absoluten Abweichungen und Differenzen im Bereich der größten Verkehrsstärken in der Morgen- und Nachmittagsspitze liegen. Im Gegensatz dazu treten jedoch die höchsten relativen Abweichungen in den Schwachlastzeiten in der Nacht auf. Sehr gut erkennbar ist auf der rechten Diagrammseite die bessere Übereinstimmung der Smartmicro Daten mit den EFZ-Referenzdaten für den Sensor 212454 gegenüber dem Sensor 212420.



Abbildung 26: Verkehrsstärke Ganglinien Vergleich Smartmicro Radardaten vs. Einzelfahrzeug-Datensatz – 30.11.2021

Um nicht nur grafische Analysen bei der Parametrierung und Qualitätsbeurteilung der Radarsensoren heranziehen zu müssen, wurden zusätzlich auch statistische Kennwerte berechnet. Nachfolgende Abbildungen zeigen für den Gesamtverkehr sowie getrennt für PKW und LKW die Ergebnisse des Mean Absolute Error (MAE) und des Maximal Error für den gesamten Tag am 30.11.2021, wie auch für spezifische Tageszeitscheiben. Auch hier zeigt sich, dass der Maximal Error in der Nachtzeit zwischen 20Uhr und 6Uhr liegt und es unterschiedliche Qualitäten einzelner Radarsensoren gibt.

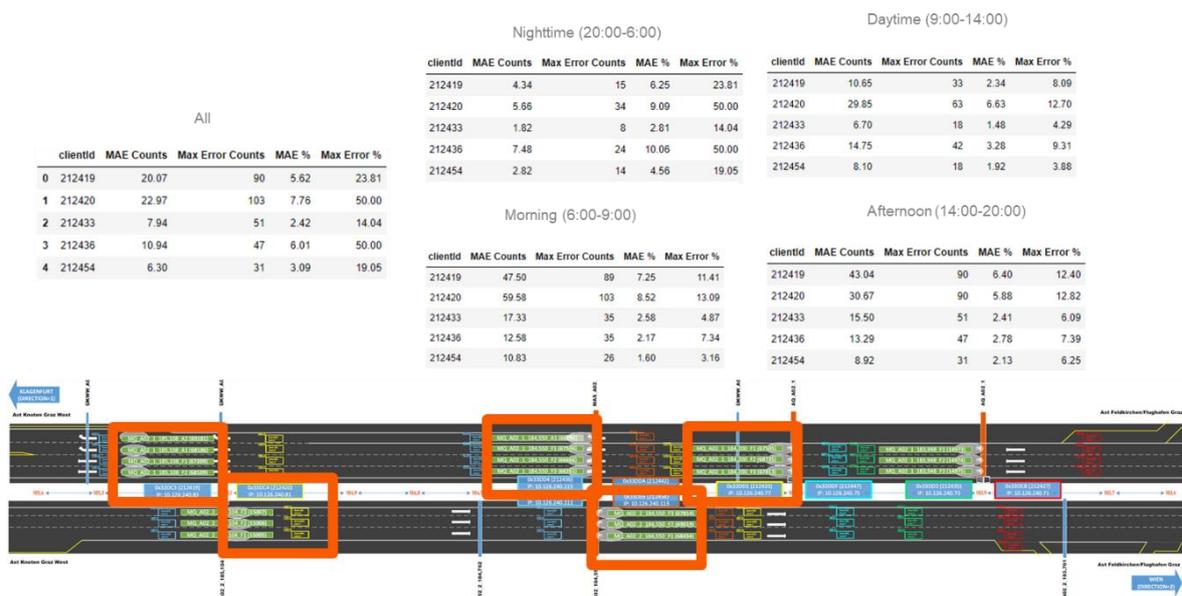


Abbildung 27: Verkehrsstärke Vergleich Smartmicro Radardaten vs. Einzelfahrzeug-Datensatz – 30.11.2021 -15min Intervall



Abbildung 28: Verkehrsstärke Vergleich Smartmicro Radardaten vs. Einzelfahrzeug-Datensatz – PKW-Datensatz - 30.11.2021 -15min Intervall

All					Nighttime (20:00-6:00)					Daytime (9:00-14:00)				
clientId	MAE Counts	Max Error Counts	MAE %	Max Error %	clientId	MAE Counts	Max Error Counts	MAE %	Max Error %	clientId	MAE Counts	Max Error Counts	MAE %	Max Error %
212419	18.56	58	22.54	70.73	212419	3.70	14	14.03	37.04	212419	24.25	38	19.38	29.63
212420	15.32	49	36.45	216.67	212420	6.41	23	43.86	216.67	212420	20.45	38	22.31	35.19
212433	13.80	43	17.87	45.68	212433	2.82	23	11.98	36.36	212433	19.05	32	15.78	24.43
212436	17.07	55	26.44	188.89	212436	5.34	24	27.21	188.89	212436	22.65	40	19.03	33.61
212454	8.27	35	14.67	60.78	212454	2.36	19	11.64	33.33	212454	8.20	20	8.71	19.61

Morning (6:00-9:00)					Afternoon (14:00-20:00)				
clientId	MAE Counts	Max Error Counts	MAE %	Max Error %	clientId	MAE Counts	Max Error Counts	MAE %	Max Error %
212419	35.50	57	32.07	50.96	212419	32.58	58	35.99	70.73
212420	21.17	35	21.19	37.88	212420	24.46	49	42.29	75.38
212433	25.42	38	23.48	36.89	212433	23.75	43	27.61	45.68
212436	33.25	55	30.70	55.00	212436	25.83	47	29.07	54.79
212454	17.33	34	17.66	39.53	212454	14.62	35	23.71	60.78

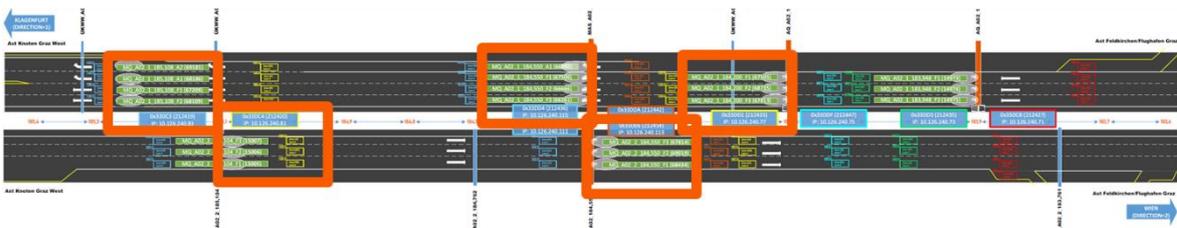


Abbildung 29: Verkehrsstärke Vergleich Smartmicro Radardaten vs. Einzelfahrzeug-Datensatz – LKW-Datensatz - 30.11.2021 -15min Intervall

Weitere Vergleiche zwischen den Verkehrsstärken der Smartmicro Radardaten und der EFZ-Referenzdaten der Einzelfahrzeug-Datensätze sind im Anhang im Abschnitt 5.4 einzusehen.

2.7.5. Geschwindigkeitsverteilungen und -histogramme

Neben den zentralen Auswertungen der Verkehrsstärken wurden auch die Geschwindigkeitswerte aus den Smartmicro „Per Vehicle Data“ Datensätze aufbereitet und analysiert. Die Geschwindigkeitswerte wurden dabei als Geschwindigkeitsverteilungen und Geschwindigkeitshistogramme dargestellt. Die folgenden vier Abbildungen zeigen die Geschwindigkeitsverteilungen und -histogramme für den 30.11.2021 sowohl in Fahrtrichtung Klagenfurt (Direction) als auch in Fahrtrichtung Wien (Direction 2). Diese Art der Diagramme und Aufbereitung der Geschwindigkeit bietet auch bei der Kalibrierung von mikroskopischen Verkehrsflussmodellen eine gute Datenbasis, sowie bei der Parametrierung der Wunschgeschwindigkeitsverteilungen in Simulationsmodellen.

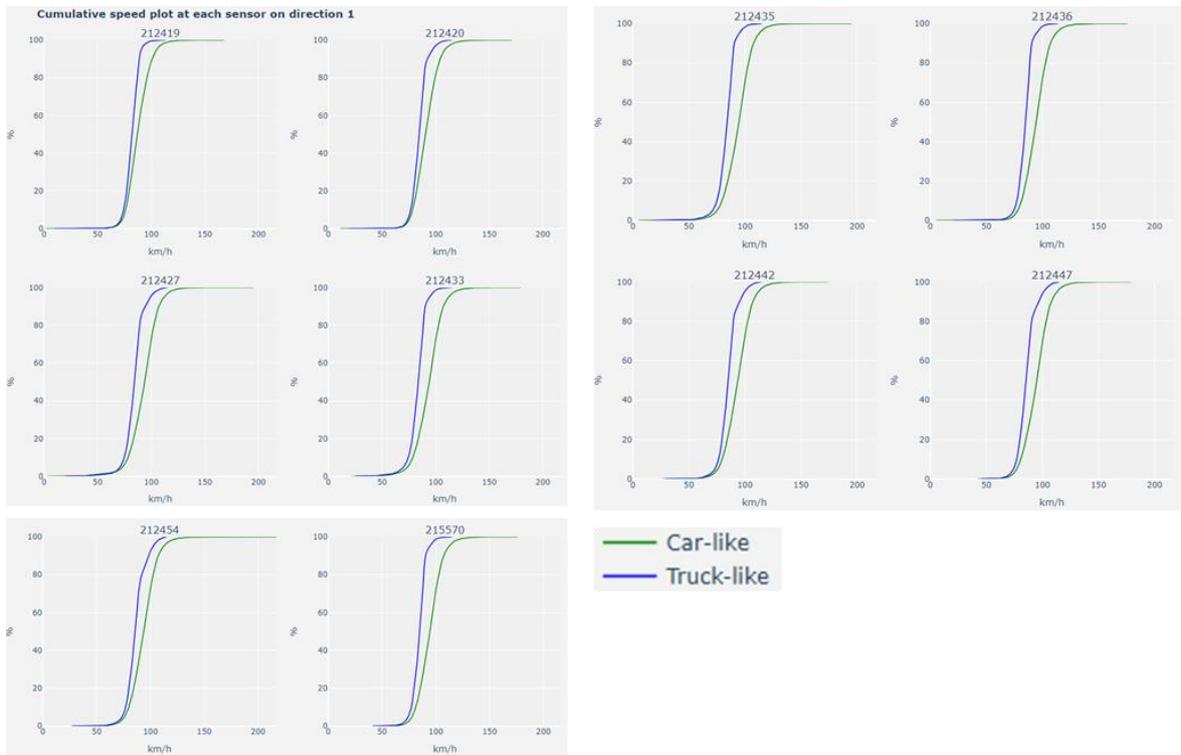


Abbildung 30: Geschwindigkeitsverteilung Fahrtrichtung Klagenfurt – 30.11.2021

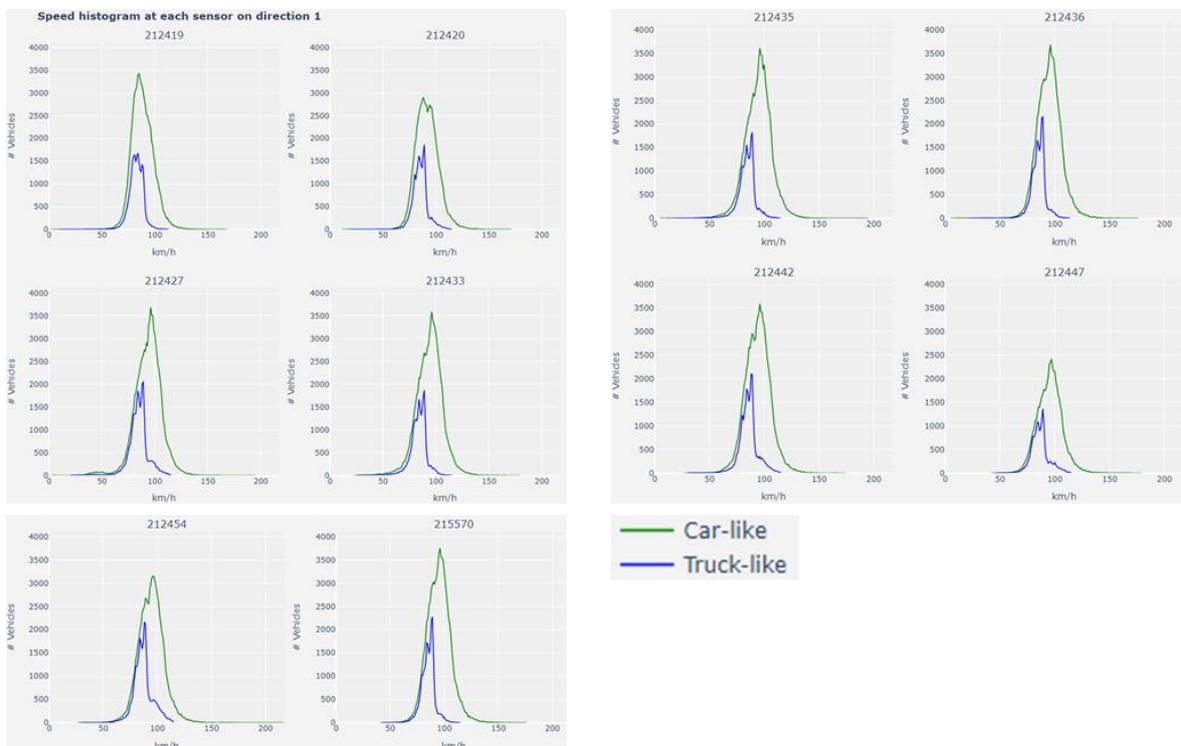


Abbildung 31: Geschwindigkeitshistogramm Fahrtrichtung Klagenfurt – 30.11.2021

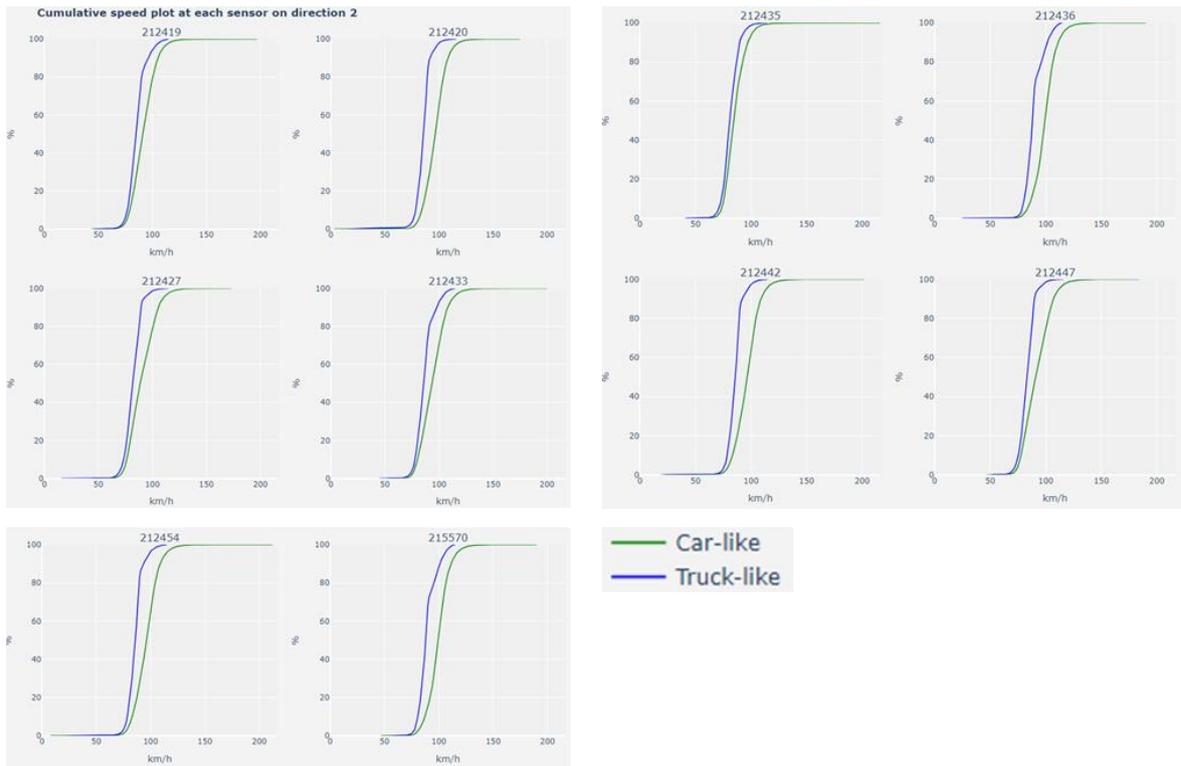


Abbildung 32: Geschwindigkeitsverteilung Fahrtrichtung Wien – 30.11.2021

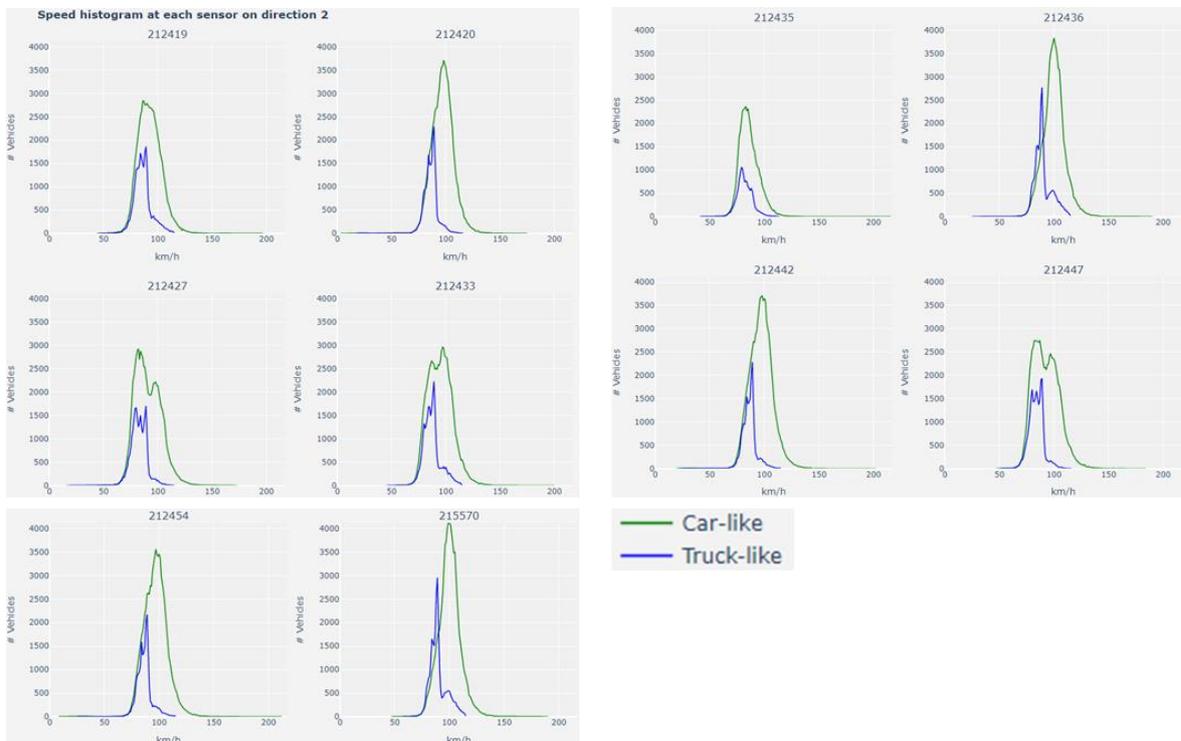


Abbildung 33: Geschwindigkeitshistogramm Fahrtrichtung Wien – 30.11.2021

2.7.6. Fundamentaldiagramm-Darstellung

Die Beziehungen zwischen den verkehrlichen Kenngrößen der Verkehrsdichte (k in KFZ/km), der momentanen Geschwindigkeit (v_m in km/h) und der Verkehrsstärke (q in KFZ/h) können im Fundamentaldiagramm dargestellt werden. Diese Kenngrößen können auf Basis empirischer Messungen (z.B. an einem Autobahnquerschnitt) vorliegen, jedoch sind nicht immer alle drei Kenngrößen gleichzeitig verfügbar (beispielsweise ist es aufwendig die Verkehrsdichte direkt zu messen). Sind zwei Verkehrskenngrößen bekannt oder empirisch ermittelbar (z.B. q und v_m), dann kann unter Verwendung der fundamentalen Beziehung $q = v_m \cdot k$ die dritte Kenngröße (z.B. k) durch Umformulierung der Gleichung direkt bestimmt werden. Bei der Anwendung der fundamentalen Beziehung muss zwischen den verschiedenen Zuständen des Verkehrsflusses unterschieden werden (stabiler und instabiler Verkehrsfluss). Übertragen auf das Fundamentaldiagramm bedeutet dies, dass ein Wert einer Verkehrskenngröße in beiden Verkehrszuständen auftreten kann. Beispielsweise kann ein bestimmter Wert der Verkehrsstärke im Fundamentaldiagramm sowohl im stabilen Verkehr mit niedriger Verkehrsdichte und hohen Geschwindigkeiten als auch im instabilen Verkehr mit hoher Verkehrsdichte und niedrigen Geschwindigkeiten auftreten. Die verkehrlichen Kenngrößen k , v_m und q können dabei im Fundamentaldiagramm untereinander in drei verschiedenen Ebenen dargestellt werden:

- Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke (q-v-Diagramm)
- Verkehrsstärke in Abhängigkeit von der Verkehrsdichte (q-k-Diagramm)
- Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Verkehrsdichte (k-v-Diagramm)

Die Leistungsfähigkeit oder Kapazität (q_{max}) tritt im Fundamentaldiagramm bei Erreichen der kritischen Geschwindigkeit (v_{krit}) und der kritischen Verkehrsdichte (k_{krit}) auf. Der Zustand des Verkehrsflusses kann noch feiner untergliedert werden in freien, teilgebundenen Verkehr, gebundenen Verkehr und Überlastung, wobei der gebundene Verkehr den Übergangsbereich zwischen stabilem und instabilem Verkehrsfluss darstellt. Die Übergänge zwischen den Zuständen sind jedoch fließend und schwer festzulegen.

Auf Basis der Smartmicro „Per Vehicle Data“ Datensätze wurden auch klassische Fundamentaldiagramme im Projektverlauf zur Analyse aufbereitet. Dabei gilt zu beachten, dass bei der Bewertung von Fundamentaldiagrammen, beispielsweise zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit eines Straßenquerschnitts, eine große Anzahl an Datenpunkte in allen Verkehrszuständen verfügbar sein muss. Innerhalb des Feldtest im Forschungsprojekt HEAt standen noch keine Langzeitdatensätze zur Verfügung um somit Leistungsfähigkeitsbewertungen anstellen zu können. Nachfolgende Abbildungen zeigen

die Aufbereitung der Smartmicro Daten für einen exemplarischen Radarsensor 212419 für beide Fahrrichtungen, wobei die Daten der 3 Werktage (29.09.2021, 16.11.2021 und 30.11.2021) in 1min und 5min Intervallen verwendet wurden. Weitere Fundamentaldiagramm-Darstellungen anderer Radarsensoren sind im Anhang in Abschnitt 5.5 ersichtlich.

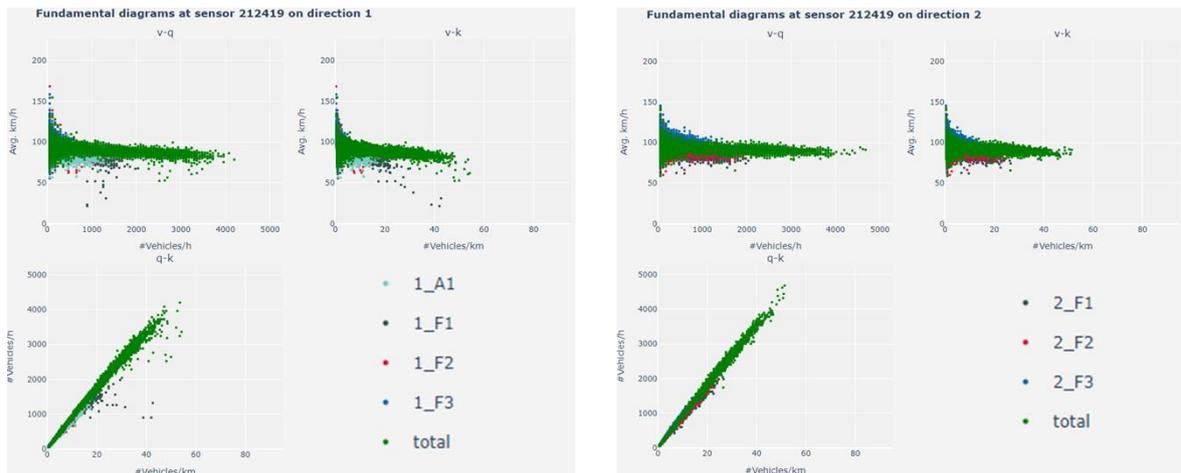


Abbildung 34: Fundamentaldiagramm-Darstellung Sensor 212419 – 3 Werktage 1min Intervall

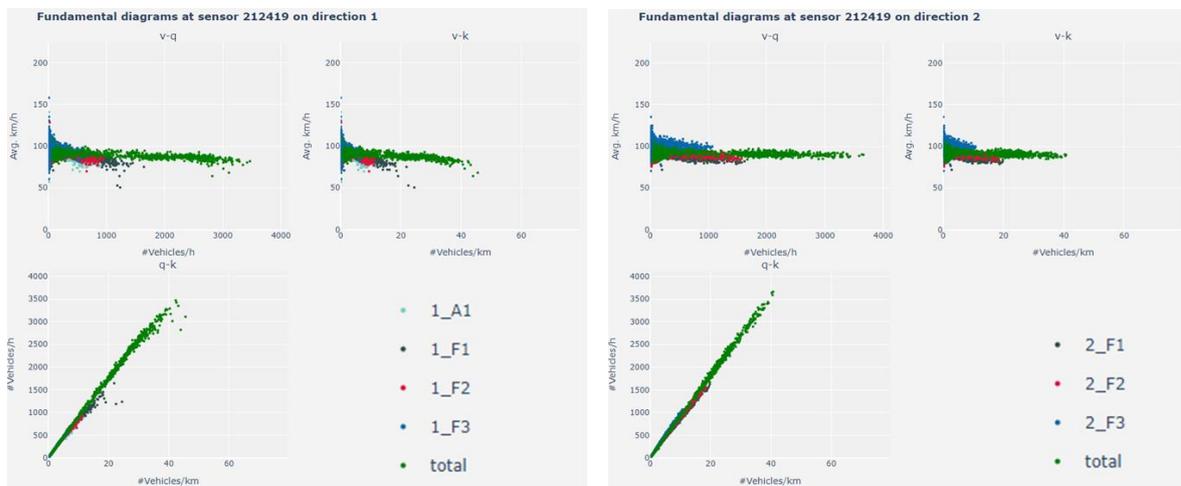


Abbildung 35: Fundamentaldiagramm-Darstellung Sensor 212419 – 3 Werktage 5min Intervall

Im Forschungsprojekt HEAt wurden EFZ Einzelfahrzeug-Langzeitdaten im Ausmaß von 8 Monaten von 31.03.2021-30.11.2021 für den Messquerschnitt 184,200km ausgehoben und von der ASFINAG zur Analyse zur Verfügung gestellt. Nachstehende Abbildung zeigt das Fundamentaldiagramm für diesen Zeithorizont für die Fahrrichtung Klagenfurt (Direction 1) in einem 5min Intervall. Hier sind im Gegensatz zu den zuvor gezeigten Diagrammen der Smartmicro-Daten auch Datensätze im gestauten Verkehrszustand verfügbar.

At 184.200

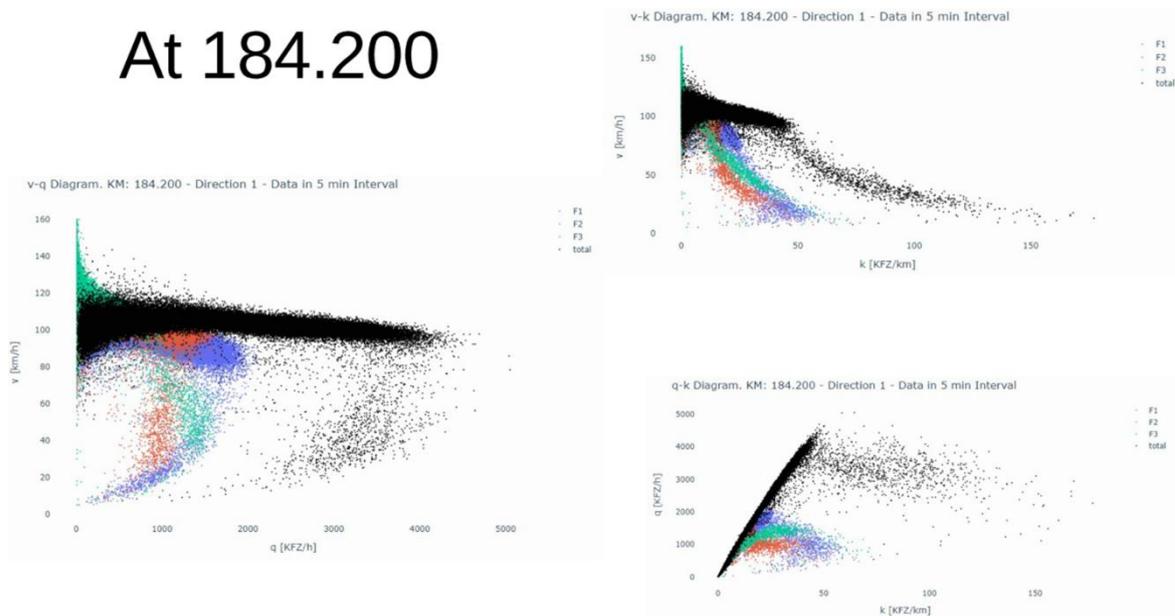


Abbildung 36: Fundamentaldiagramm-Darstellung EFZ Einzelfahrzeug Langzeitdaten - 31.03.2021-30.11.2021

Die oben abgebildeten Diagramme des Fundamentaldiagramms lassen sich auch wie nachstehend zu sehen als dreiteilige Fundamentaldiagramm-Darstellung abbilden, wobei die Achsen hier auf Minuten-Werte skaliert sind und nicht auf Stundenwerte. Bei dieser Darstellung wird auf die fahstreifenfeinen Datenpunkte verzichtet. Die maximale Verkehrsstärke q_{\max} und damit auch die Kapazität dieses Streckenquerschnitts lässt sich bei 78 KFZ/min erkennen, was in der Stunde 4680 KFZ/h auf diesem dreistreifigen Streckenabschnitt bedeutet. Damit liegt die hier ermittelte Kapazität unter der in der RVS 03.01.11 angegebenen Leistungsfähigkeit von 5200 KFZ/h bei drei Fahrstreifen und einem Schwerverkehrsanteil von 20% (aus Abschnitt 2.7.2 ergaben sich rund 22% Schwerverkehrsanteil aus den Smartmicro Datensätzen). Am Scheitelpunkt des q-v-Diagramms lässt sich eine kritische Geschwindigkeit (v_{krit}) von 97,9 km/h ablesen. Die entsprechende kritische Verkehrsdichte (k_{krit}) beläuft sich auf 48 KFZ/km auf dem dreistreifigen Straßenquerschnitt auf KM 184.200 in Fahrtrichtung Klagenfurt. In nachfolgender Abbildung wurden die Datenpunkte in unterschiedlichen Farbschattierungen klassifiziert. Dabei sind sehr gut die Übergänge mit den jeweiligen Kenngrößen zwischen stabilem und instabilem Verkehrsfluss zu erkennen. Der gebundene Verkehr würde zusätzlich im Übergangsbereich zwischen stabilem und instabilem Verkehrsfluss liegen.

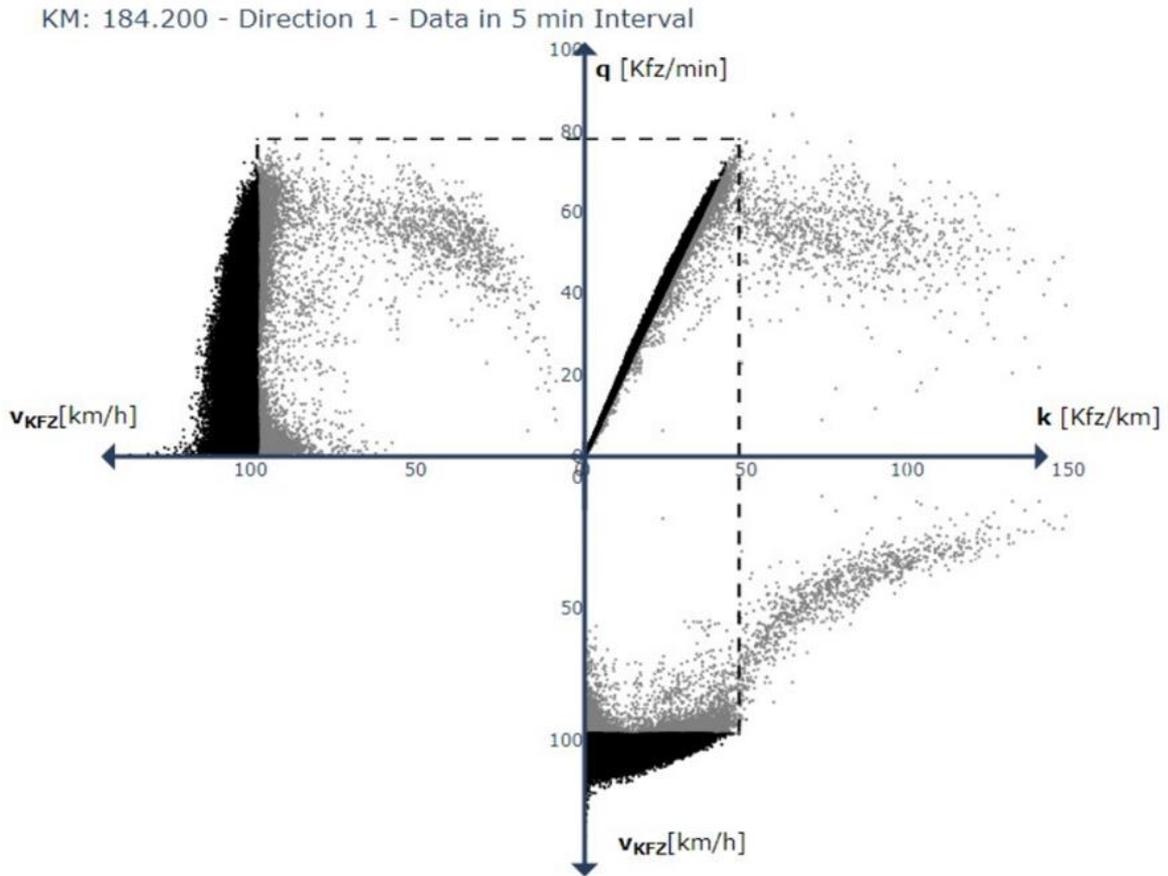


Abbildung 37: Dreiteilige Fundamentaldiagramm-Darstellung EFZ Einzelfahrzeug Langzeitdaten - 31.03.2021-30.11.2021

2.7.7. Sensorreichweitenanalyse

Wichtig im Zuge der Bearbeitung und für die Beurteilung der Smartmicro Radarsensoren war auch die Analyse der möglichen zu erzielenden Sensorreichweiten. Dabei wurden die Smartmicro „Object Data“ Datensätze aufbereitet und geplottet, um die Ausdehnung der erfassten Datenpunkte auch grafisch analysierbar zu machen. Folgende Abbildung zeigt die Punktdaten der einzelnen Objektdaten für 4 ausgewählte Radarsensoren (212436, 212433, 212442, 212454), wobei diese auch farblich je nach Fahrstreifen aufgetragen wurden, um eine bessere Übersichtlichkeit bereitzustellen. Das schwarze X markiert hier den Standort des Sensors. Man erkennt ganz eindeutig, dass die Objektdaten unterschiedliche Ausdehnung je nach Fahrtrichtung aufweisen. Dies muss gerade bei der Konzeption und Montage der Sensorsysteme beachtet und bei der Aufbereitung von Trajektorien Daten berücksichtigt werden, um einen Handover-Bereich zweier benachbarter Sensorbereiche gewährleisten zu können.

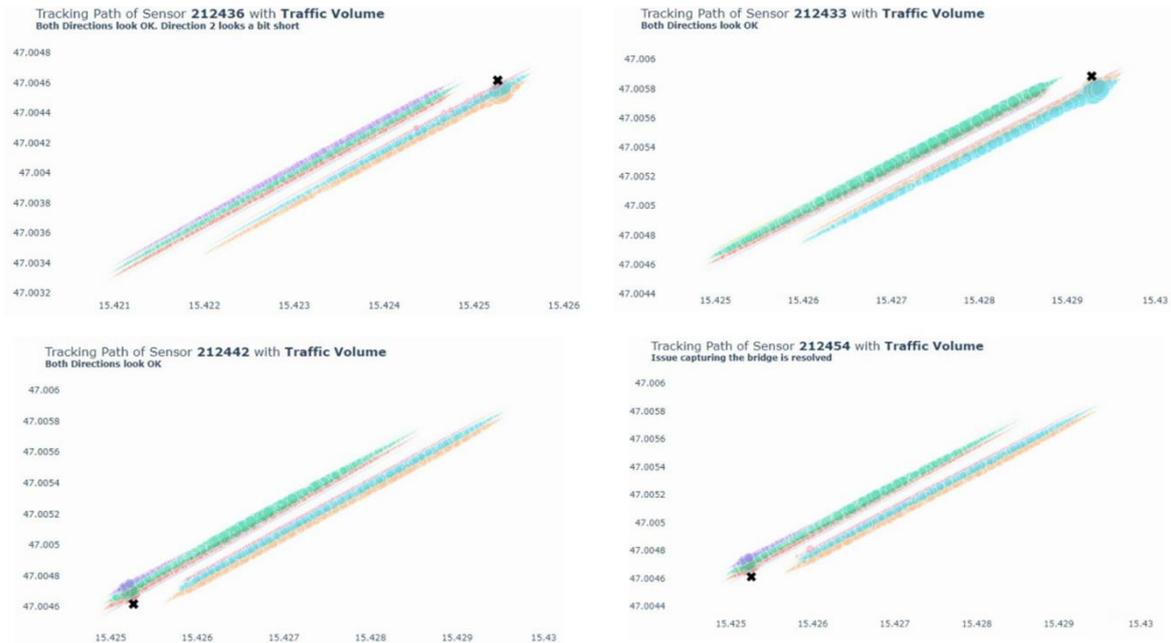


Abbildung 38: Erfassungsbereich Smartmicro „Object Data“ – 30.11.2021

Neben den Smartmicro „Object Data“ Datensätze wurden auch aus den Navtech-Radardaten die Erfassungsbereiche in Diagrammen geplottet. Im Testfeld existieren 3 Navtech-Radarsysteme, welche in 360° messen können. Die Detektionsbereiche der Navtech-Sensoren liegen hier in Ausdehnungen zwischen 498m für den Navtech Radarsensor 2 und 727m für den Navtech Radarsensor 3 und gelten als Vergleichswert für die Erfassungsbereiche der im Projekt HEAt getesteten Smartmicro Radarsensoren.



Abbildung 39: Erfassungsbereich Navtech Radardate– 30.11.2021

Aus den Smartmicro „Object Data“ Datensätzen lassen sich anhand der Attribute „facing“ und „frontFacing“ zudem die Sensorreichweiten der einzelnen Sensoren und im speziellen auch die Verteilung der Sensorreichweiten in beide Fahrtrichtungen analysieren.

Nachfolgende Diagramme fassen die Sensorreichweiten zusammen. Die Maximale Sensorreichweite beträgt demnach rund 383m. Damit ist die Reichweite deutlich geringer als jene der Navtech Radarsensoren im Testfeld, wobei diese in 360° messen können.

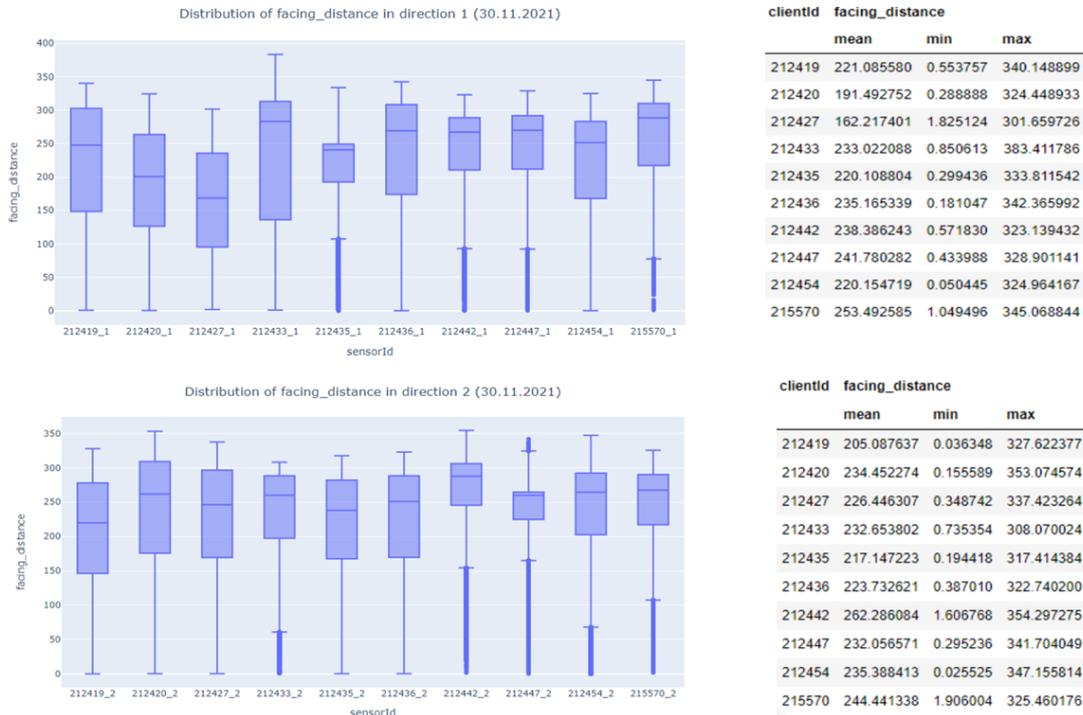


Abbildung 40: Sensordistanzanalyse aus Smartmicro Object Data facing Attribut – 30.11.2021

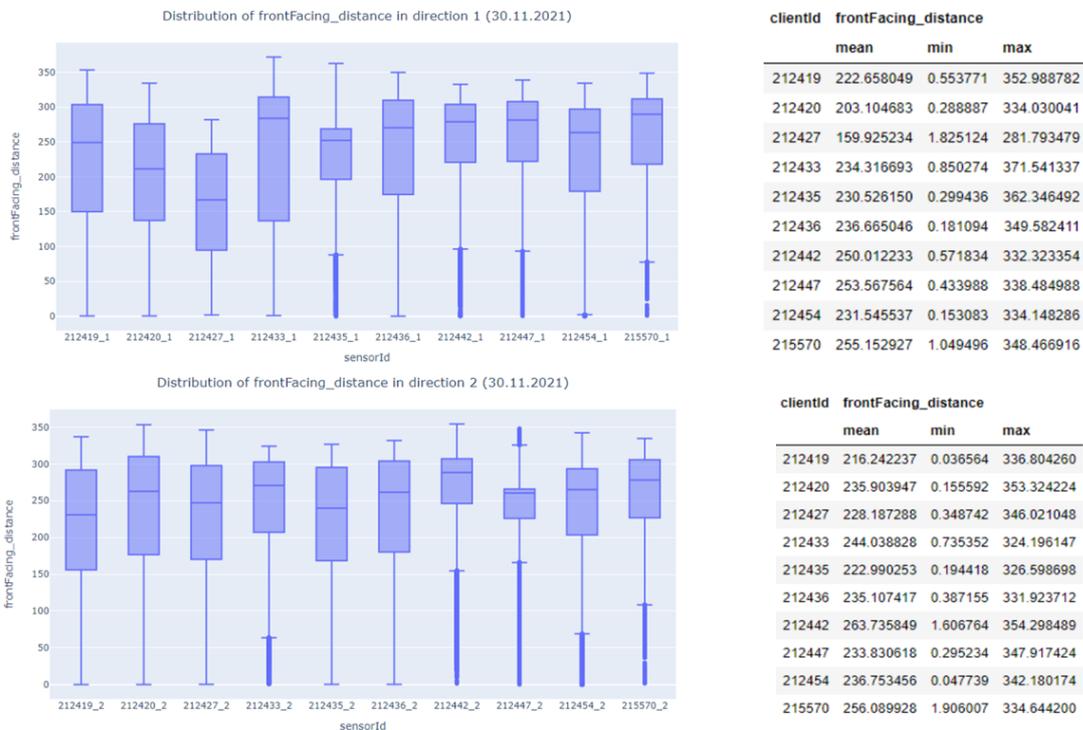


Abbildung 41: Sensordistanzanalyse aus Smartmicro Object Data frontFacing Attribut – 30.11.2021

2.8. Trajektorienanalyse

Die Daten aus Kapitel 2.7 wurden in gleicher Weise für die Trajektorienanalyse verwendet. Das Ziel war die Sensorenoutputs an den einzelnen Standorten zu Trajektorien zusammenzufassen (räumlich und zeitlich) und mit einem algorithmischen Ansatz zu einer Gesamtrajektorie über die Versuchsstrecke zu fusionieren. Gewählt wurde eine Methodik aus einer Kombination von intern entwickelten Tools basierend auf Ergebnissen aus Trajektorienanalysen aus Schifffahrtsdaten und Zusammenfassungsalgorithmen von Einzeltrajektorien aus der Fussgängererfassung. In Abbildung 42 ist der Ablauf der Trajektorienanalyse festgehalten.

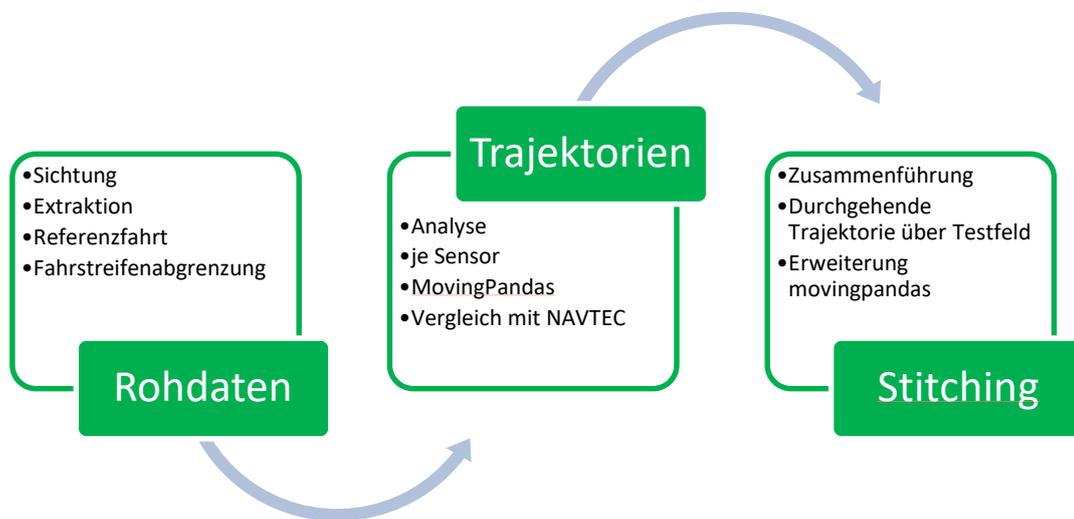


Abbildung 42: Ablaufschematik Trajektorienanalyse

Die Rohdaten wurden mittels Hadoop-Server von Seiten der ASFINAG zur Verfügung gestellt und konnten direkt bezogen werden. Dabei wurden neben den Sensordaten von Navtech und Smartmicro auch Daten von einer Testfahrt mit einem automatisierten Fahrzeug bezogen. Diese Daten wurden mit einem hochauflösenden DGPS-System festgehalten und auf dem besagten Autobahnabschnitt durchgeführt. Damit konnte eine „ground truth“ für das Zusammenfügen der einzelnen Trajektorien je Sensorstandort durchgeführt werden. Weiters wurden auch die Fahrstreifenbegrenzungen in einem Datensatz bereitgestellt, um die Abdeckung der Sensoren evaluieren zu können. In einem ersten Analyseschritt wurde die python-Bibliothek movingpandas von Anita Graser¹ eingesetzt. Ein weiterer Analyseschritt war das Zusammenfügen mittels Fussgängertrajektorien-Stitchingalgorithmus. Dieser Ansatz zeigte eine gute Performance.

¹ <https://anitagraser.github.io/movingpandas/>

Das Zusammenfügen der Einzeltrajektorien wurde im Zuge des Projekts auch in movingpandas integriert. In Abbildung 43 sind Beispiele der beiden Ansätze dargestellt.

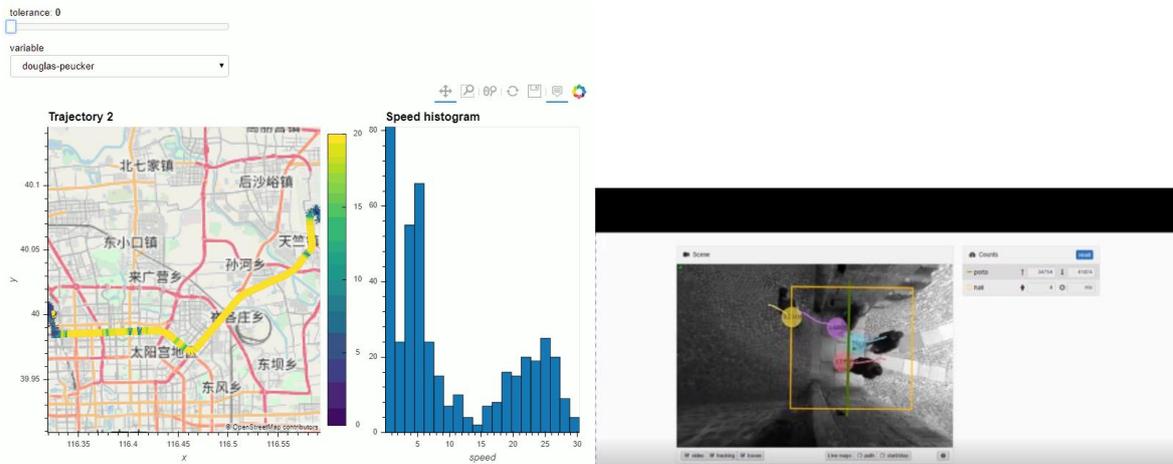


Abbildung 43: movingpandas und Stitching Fußgängertrajektorien

Die movingpandas Bibliothek wurde im Zuge eines Forschungsprojekts zur Abschätzung von Trajektorien im Schiffsverkehr AIT-intern entwickelt und auf github zur Verfügung gestellt. Neben der Berechnung von Trajektorien aus spatio-temporalen Daten ist eine eingehende Qualitätskontrolle vorgelagert. Wie in der nachstehenden Abbildung 44 dargestellt, basiert movingpandas auf Analysen in der spatio-temporalen Umgebung. Ein erster Ansatz ist das Sichten der Daten und das Detektieren von Lücken und Unregelmäßigkeiten. Daraus ermitteln sich neben Auffälligkeiten auch Parameter für das Berechnen der Trajektorien aus den Sensordaten selbst, wie etwa mittlere Punktabstände, Häufigkeiten der Detektionen oder Häufungen von Objekt-IDs.

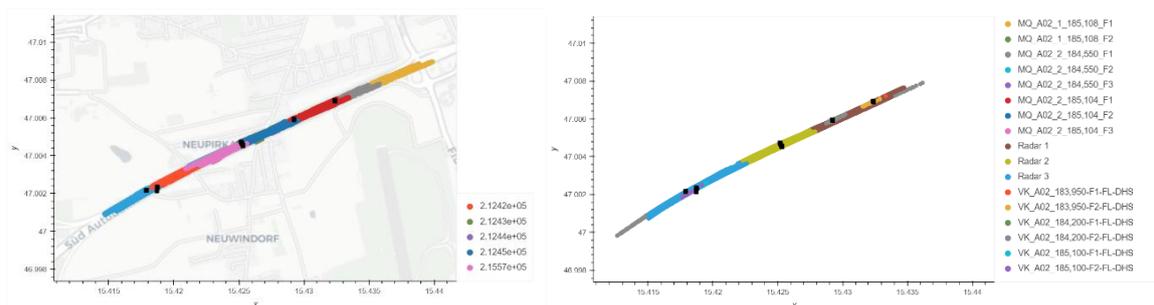


Abbildung 44: Punktwolkendarstellung der Sensoren Smartmicro und Navtech

Zusätzlich zu den Smartmicro-Daten wurden auch die Navtech-Daten analysiert um neben der kontrollierten Messfahrt eine weitere Datenquelle zum Vergleich bereit zu haben. Die Navtech-Daten wurden jedoch nicht mit einer Berechnung der Trajektorien behandelt, da hier bereits sensorfusionierte Daten vorlagen. Das Endergebnis nach dem Schritt mit

movingpandas ist eine Übersicht über den Gesamtdatensatz hinsichtlich Qualität und eine Berechnung aller Trajektorien je Sensorstandort, wie in Abbildung 45 und Abbildung 46 dargestellt.

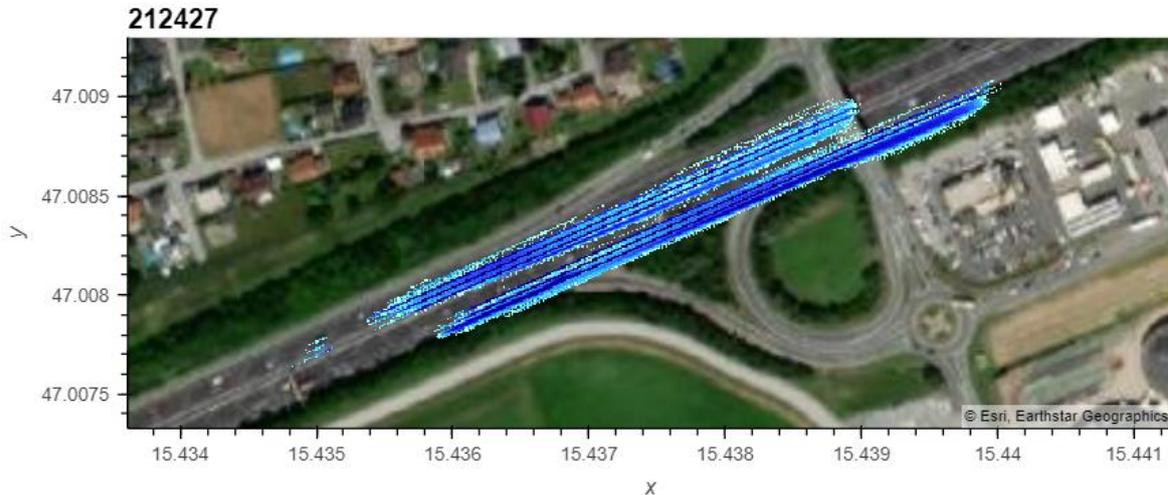


Abbildung 45: Heatmapdarstellung der Punktwolken für Sensorquerschnitt 212427

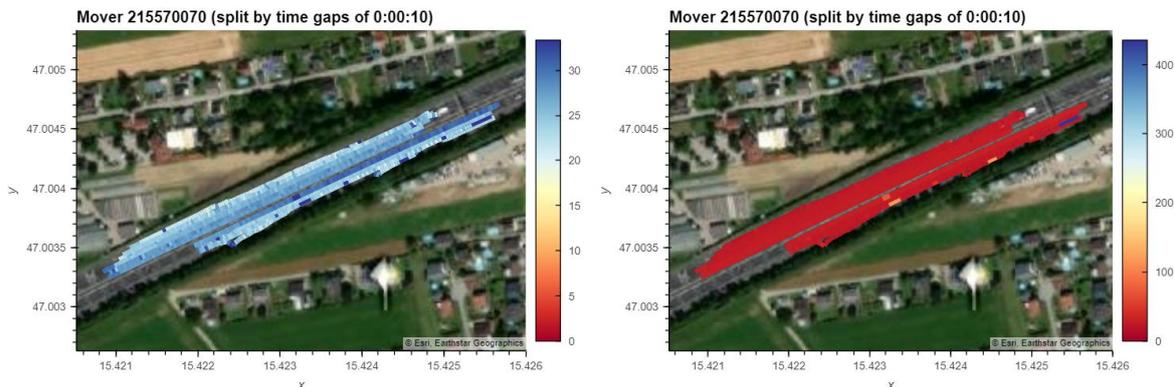


Abbildung 46: Erfasste Trajektorien und berechnete Geschwindigkeiten nach movingpandas-Methodik

Als Quervergleich mit der Auswertungsarbeit des Projektpartners Know-Center wurden ebenfalls erfasste Trajektorienlängen direkt aus den movingpandas-Daten errechnet und in Abbildung 47 dargestellt. Diese Ergebnisse decken sich mit den Erkenntnissen aus der vorangegangenen Datenanalyse.

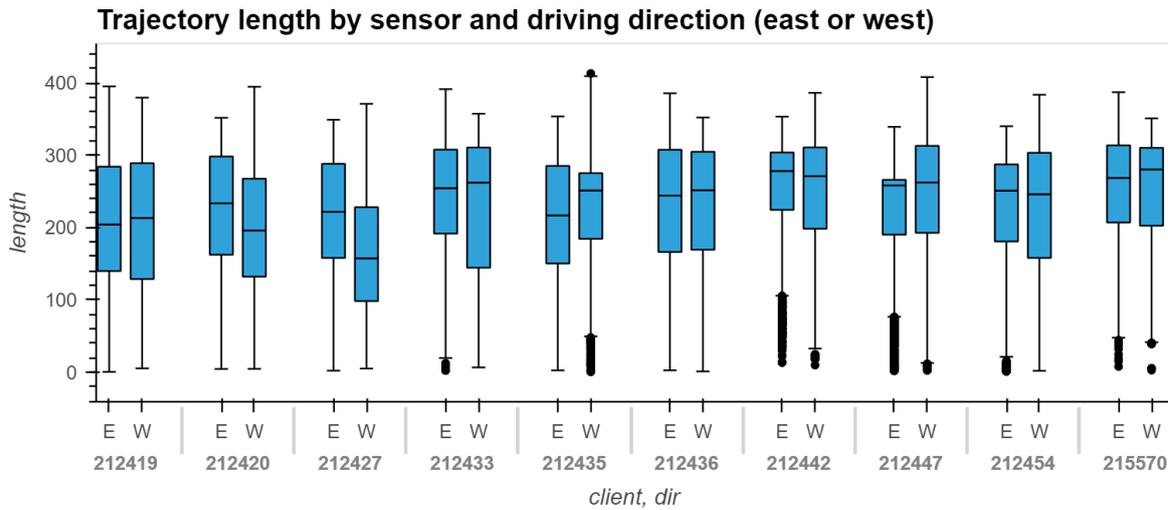


Abbildung 47: Erfasste Längen der Trajektorien je Sensor-ID

Die errechneten Trajektorien wurden in einem weiteren Schritt dem Algorithmus zum Zusammenfügen von Fußgängertrajektorien übergeben. Im Gesamten Messbereich der neuen Sensoren wurde am Erhebungstag eine Baustelle bearbeitet, die neben Spurverschwenkungen auch einen Fahrstreifen in der Gegenfahrbahn vorgesehen hat. Dieser Umstand führte zu einer Abweichung der Trajektorien von der eigentlichen Fahrstreifen Geometrie, wie in Abbildung 48 dargestellt. Alle Ergebnisse der finalen Trajektorien liegen aber dennoch in Bereich der Fahrbahnaußengrenze, dies ist auf die Verschwenkung in Richtung Pannenstreifen der Fahrtrichtung Wien (Osten) zu erklären. Eine Aussage über Lagegenauigkeit der Trajektorien in Bezug auf die einzelnen Fahrstreifen ist aus diesem Grund nicht möglich, hinzu kommt noch ein systembedingter Versatz der erfassten Objekte im östlichen Bereich des Erfassungsraumes um rund 340m in Querrichtung.



Abbildung 48: Ergebnisse Trajektorien mit Lage in Fahrstreifengeometrie im Baustellenbereich

Die Ergebnisse aus den Trajektorienzusammenfassungen aus der Fußgängersimulation zeigten, bedingt durch die Fahrspur in der Gegenrichtung, wie oben angeführt, dass der generelle Ansatz wirkungsvoll ist, aus einem kleinen Testsample über eine Stunde konnten ohne Anpassungen des Algorithmus selbst 10% der Trajektorien für den gesamten Erhebungsraum zusammengefügt werden. Da movingpandas mit diesem Feature noch nicht erweitert wurde, wurde die Methode aus der Fußgängersimulation in movingpandas integriert und wird nach der Projektlaufzeit als offiziellen Release im github-Projekt bereitgestellt werden.

3. ZUSAMMENFASSUNG

3.1. Projektfazit

Mit den im Feldtest zu evaluierenden neuen Radarsensoren der Firma Smartmicro wurden kostengünstige Alternativen zu bereits bestehenden Navtech Radarsensoren am ASFINAG-Netz gefunden. Mit dem kosteneffizienten TRUGRD Stream Radarsensor mit integrierter Videokamera der Firma Smartmicro wurde auf Basis der Markterhebung von Sensorsystemen ein Radarsensor getestet, der den Genauigkeitsanforderungen an hochauflösende Fahrzeugpositionserkennung mit möglichst genauen Fahrzeug-Parameter erfüllen kann. Der getestete Radarsensor verfügt somit um ein sehr gutes Kosten/Nutzen-Verhältnis und hat das Potential für eine erweiterte Anwendung im ASFINAG-Streckennetz. Über das Projekt hinaus, wird die ASFINAG neue Smartmicro Radarsensoren in Zukunft insbesondere in Tunnelbereichen testen, um auch hier erste Erfahrungen zur Datenqualität sammeln zu können. Hierbei kann auf die im Projekt HEAt erarbeiteten skriptbasierten Analysemodule zurückgegriffen werden. Die im Zuge des Feldtests generierten Erkenntnisse bezüglich der Genauigkeiten des neu implementierten Sensorsystems kann den Genauigkeitsanforderungen aus dem Ausschreibungsleitfaden in ausreichender Qualität genügen. Folgende Merkmale des Gesamtsystems wurden laut Ausschreibungsleitfaden als Mindestanforderung angesehen und kann durch die Smartmicro Radarsensoren abgedeckt werden:

- Nachverfolgung von Fahrzeugen (Trajektorien) in möglichst hoher Genauigkeit und Durchgängigkeit, wobei hier noch Forschungsbedarf in Bezug auf Handover von Trajektorien benachbarter Sensoren besteht.
- Verkehrszählung, Einzelgeschwindigkeiten, Nettozeitlücke zwischen Fahrzeugen: Sowohl Einzelfahrzeugdaten als auch aggregierte Verkehrskennwerte können aus den 3 unterschiedlichen Smartmicro Datensätze (Per Vehicle Data, Object Data und Statistics Data) erfasst und aufbereitet werden.
- Fahrzeuglänge bzw. Fahrzeugklassifizierung in mindestens 3 Klassen (PKW, LKW, andere): Die Smartmicro Radarsensoren mit integrierter Videokamera sind in der Lage 9 Fahrzeugklassen zu erkennen. Zudem kann auch die Fahrzeuglänge erfasst werden.
- Detektion von Ereignissen (Stau, Geisterfahrer, stehengebliebene Fahrzeuge, Langsamfahrer, verlorene Objekte) konnten im Feldtest situationsbedingt erkannt werden. Automatisierte Analysemodule zur Detektion von Incidents wurden im

Projekt HEAt jedoch nicht erstellt, da diesbezüglich die Datenmengen des Feldtests noch zu gering waren. Um diesen Punkt weiterzuverfolgen benötigt es Langzeitdaten von mehreren Wochen und Monaten die im Zuge der Projektbearbeitung noch nicht vorliegend waren.

- Wetter- und Temperaturunabhängig (Regen und Schneefall trüben die Ergebnisse kaum): Die Radarsensoren an sich wurden mit zusätzlichen Schneeschildern ausgestattet und genügen den Anforderungen an Wetter- und Temperaturunabhängigkeit. In Bezug auf witterungsbedingte Einflüsse auf die Sensordatenqualität konnte in der Datenanalyse noch keine schlechten Erfahrungen gesammelt werden.
- Beleuchtungsunabhängig (bei Tag und Nacht, Schatten, Nebel): Die in der Projektlaufzeit durchgeführten Sensoranalysen zeigen keine beleuchtungsabhängige Verschlechterung der Sensorqualität in den Analyseergebnissen.
- Ausgabe von aggregierten Verkehrsparametern (Verkehrsmenge, Durchschnittsgeschwindigkeit, Verkehrsdichte pro Stunde und Fahrtrichtung) wurden mit den Referenzdaten der EFZ-Einzelfahrzeugdaten als „Ground Truth“ validiert und kann die geforderten Genauigkeitsanforderungen erfüllen.
- Ausgabe von Einzelfahrzeugdaten (Position, Spur, Geschwindigkeit, Fahrzeugklasse) wurden mit den Einzelfahrzeugdaten als „Ground Truth“ validiert und kann die geforderten Genauigkeitsanforderungen erfüllen.
- Erfassungsbereich durchgängig min. 500 m ohne Blindspots: Der Erfassungsbereich der Smartmicro Sensoren erreicht eine Sensorreichweite von rund 300m und kann diese Anforderung nicht komplett erfüllen.
- Erfassungsrichtung beide Fahrtrichtungen: Die Smartmicro Radarsensoren können einen gesamten Autobahnquerschnitt mit bis zu 12 Fahrstreifen erfassen und abdecken und kann mit und gegen die Fahrtrichtung den Verkehr erfassen.
- Genauigkeit:
 - Erfasste Fahrzeuge 90% genau: Kann eingehalten werden
 - X/Y Koordinaten (Lage) von 20 cm über den gesamten Detektionsbereich bzw. zeitliche Auflösung min 200 ms (min. 5 Positionserfassungen pro Sekunde): Kann eingehalten werden. Die zeitliche Auflösung liegt bei 100ms
 - Geschwindigkeit auf 5% genau: Kann eingehalten werden
 - Klassifizierung auf 85% genau: Kann eingehalten werden

- Bereitstellung der Daten in einer Datenbank für min. 24 h: Wurde über den Hadoop-Cluster und MongoDB der ASFINAG gelöst
- Netzwerктаuglichkeit mit max. Bandbreite von 10 MBit/s je Sensor
- Qualitätssicherungsmechanismen (Störungsmeldung, Konfidenzwerte, etc.): Störungsmeldungen werden durch die Smartmicro TMC Software abgedeckt. Um weitere Qualitätssicherungsmechanismen in Form von Störungsmeldungen und Konfidenzwerten aufbereiten zu können, benötigt man Langzeitdaten, die noch nicht vorliegend waren.
- Konfiguration erfolgt (teil-)automatisiert: Durch die Python-basierten Analyseskripte können im Nachgang an das Projekt die Analysen und Konfigurationen von weiteren Radarsensoren durchgeführt werden.
- Die Montage des Sensors sollte auf Masten und Gantries möglich sein und Störungen anderer vorhandener Systeme (z.B. Mauteinhebung, etc.) sind unbedingt zu vermeiden: Die Montage der Smartmicro Radarsensoren wurden nicht invasiv auf den Überkopfwegweiser im Testfeld angeordnet, dabei wurden keine Störungen anderer Systeme offensichtlich.

3.2. Weiterer zukünftiger Entwicklungsbedarf

Im Forschungsprojekt HEAt kam es zu einer Neuausrichtung der Projektziele hinzu einer prototypischen Anwendung eines Sensorsystems für die Erfassung des Verkehrsgeschehens und von Fahrzeug-Trajektorien. Mit dem Smartmicro Radarsensor TRUGRD Stream mit integrierter Videokamera wurde ein kostengünstiges und leistungsfähiges Sensorsystem ausfindig gemacht und im Zuge eines Feldtests am ASFINAG -Streckennetz getestet. Dabei konnte eine hohe Qualität der Sensordaten erzielt und erste Erfahrungen bei der Konfiguration und Parametrierung der Sensoren gewonnen werden. Nichtsdestotrotz besteht auch über die Projektlaufzeit hinaus noch genügend Forschungsbedarf hinsichtlich der Evaluierung und Optimierung der im Projekt getesteten Smartmicro Radarsensoren. Wir sehen vor allem in folgenden Bereichen weiteren Forschungs- und Entwicklungsbedarf:

- Vertiefte Datenanalyse von Smartmicro Langzeitdaten, um Qualitätsschwankungen der Sensordaten erfassen und Qualitätssicherungsmechanismen (Störungsmeldung, Konfidenzwerte, etc.) erarbeiten zu können.
- Vertiefte Methodenanpassung bezüglich der im Projekt HEAt angestoßenen Trajektorienanalysen und Verbesserung des Stitchingalgorithmus.

- Sensordatenfusion der neuen Smartmicro Datensätze mit Daten aus den bereits bestehenden Sensorsystemen am ASFINAG-Streckennetz, um einen wertvollen Beitrag beim Aufbau der digitalen Infrastruktur durch streckenseitig montierte Sensorsysteme liefern zu können.
- Einbindung der Analysemodule in eine ASFINAG-WebGUI für zentrale Diagnose, Konfiguration und Parametrierung beziehungsweise zur automatisierten Detektion von Ereignissen (Stau, Geisterfahrer, stehengebliebene Fahrzeuge, Langsamfahrer, verlorene Objekte). Beziehungsweise Erweiterung der Anzeigebereichs um die im Forschungsprojekt HEAt erarbeiteten Analysediagramme innerhalb der bestehenden ASFINAG-WebGUI der Firma Tieto

4. LITERATUR

Harrer M., Gunitzberger R., Baumgartner N. (2018): Das Verkehrsmanagementsystem und die Verkehrsinformationsdienste der ASFINAG. In Riegelhuth G., Sandrock M. (Hrsg.) Verkehrsmanagementzentralen für Autobahnen – Aktuelle Entwicklungen aus Deutschland, Österreich und der Schweiz. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Kapitel 2, Seiten 11-71, Springer, Wiesbaden, DOI 10.1007/978-3-658-22140-9, 2018.

Hunter, J.D. Matplotlib: A 2D graphics environment. Comput. Sci. Eng. 2007, 9, 99–104, doi:10.1109/MCSE.2007.55.

Mckinney, W. Data Structures for Statistical Computing in Python. In Proceedings of the Proceedings of the 9th Python in Science Conference; Walt, S. van der, Millman, J., Eds.; 2010; Vol. 1697900, pp. 51–56.

Pedregosa, F.; Michel, V.; Grisel, O.; Blondel, M.; Prettenhofer, P.; Weiss, R.; Vanderplas, J.; Cournapeau, D.; Varoquaux, G.; Gramfort, A.; et al. Scikit-learn: Machine Learning in Python. J. Mach. Learn. Res. 2011, 12, 2825–2830, doi:10.1007/s13398-014-0173-7.2.

Waskom, M.; Botvinnik, O.; O’Kane, D.; Hobson, P.; Lukauskas, S.; Gemperline, D.C.; Augspurger, T.; Halchenko, Y.; Cole, J.B.; Warmenhoven, J.; et al. Mwaskom/Seaborn: V0.8.1 (September 2017).

5. ANHANG

5.1. Verkehrsstärkeganglinien Per Vehicle Data – 30.11.2021

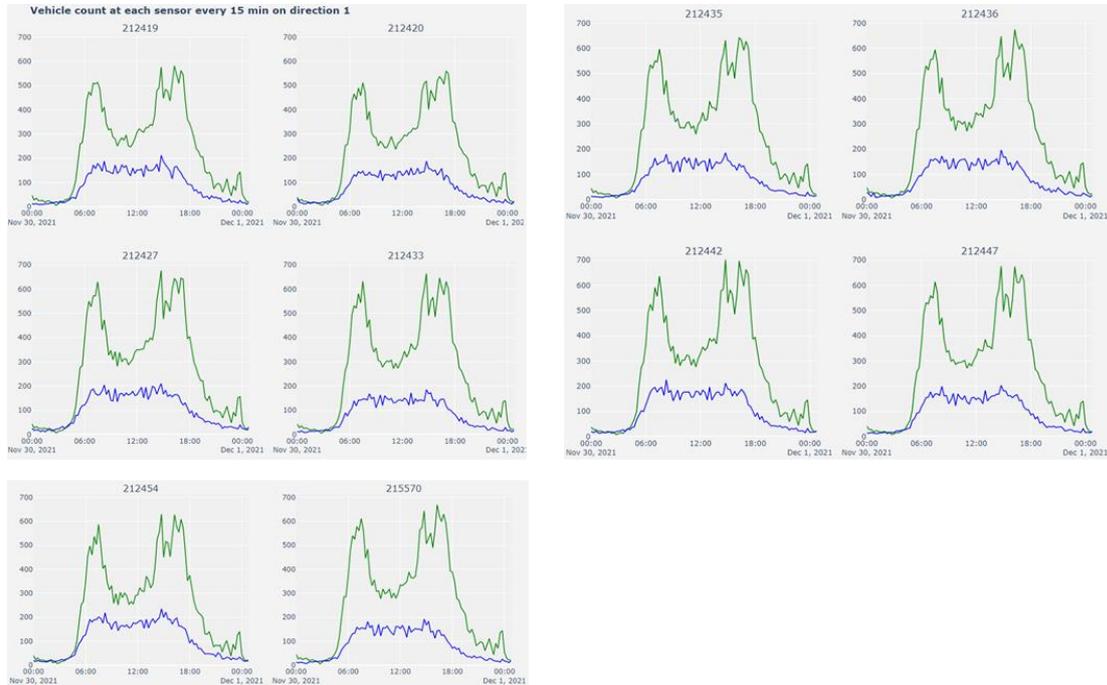


Abbildung 49: PKW und LKW Verkehrsstärkeganglinien Fahrtrichtung Klagenfurt - 30.11.2021 – 15min Intervall

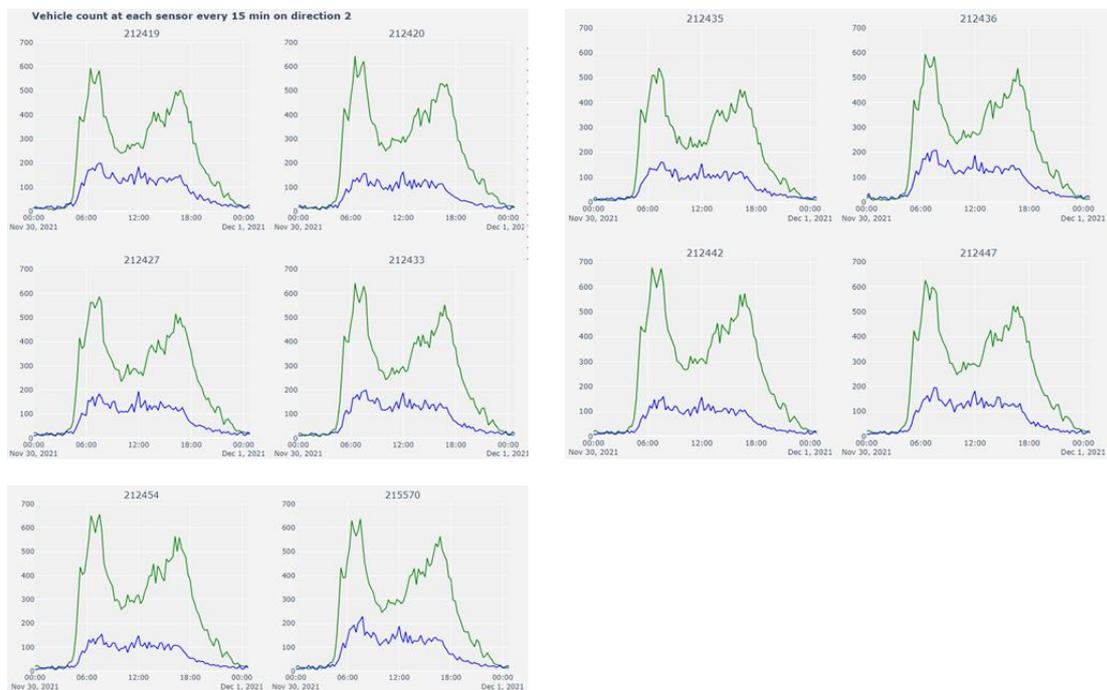


Abbildung 50: PKW und LKW Verkehrsstärkeganglinien Fahrtrichtung Wien - 30.11.2021 – 15min Intervall

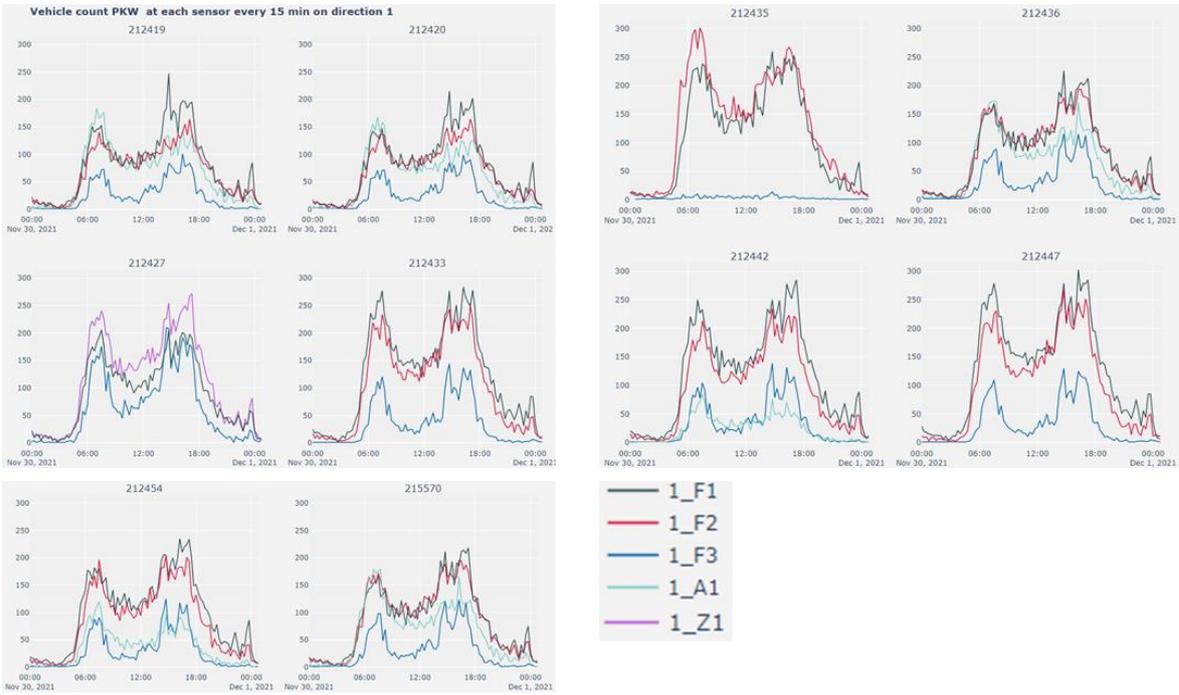


Abbildung 51: Fahrstreifenfein PKW Verkehrsstärkeganglinien Fahrtrichtung Klagenfurt - 30.11.2021 – 15min Intervall

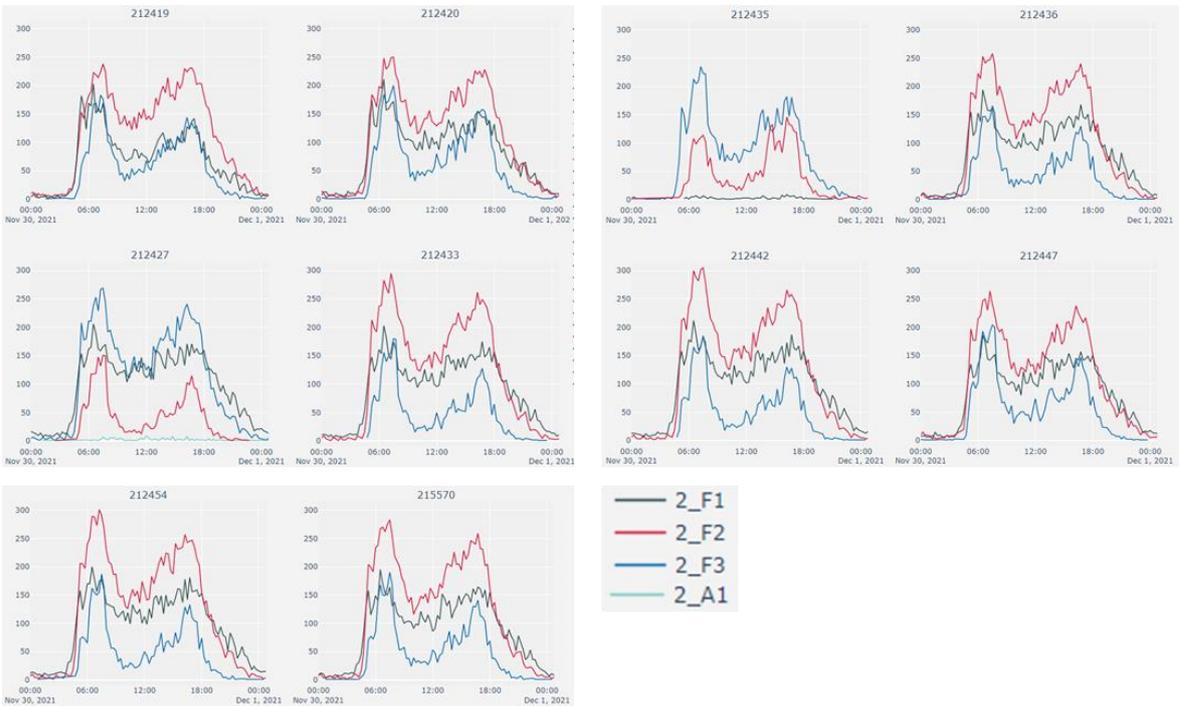


Abbildung 52: Fahrstreifenfein PKW Verkehrsstärkeganglinien Fahrtrichtung Wien - 30.11.2021 – 15min Intervall

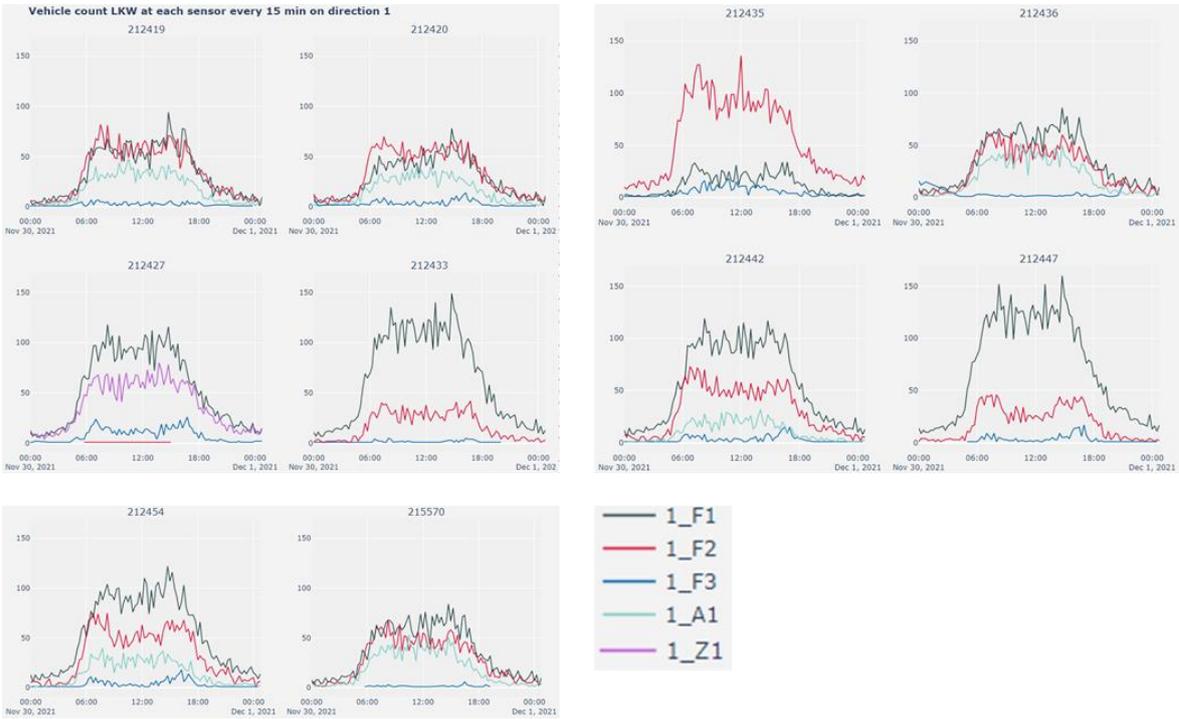


Abbildung 53: Fahrstreifenfein LKW Verkehrsstärkeganglinien Fahrtrichtung Klagenfurt - 30.11.2021 – 15min Intervall

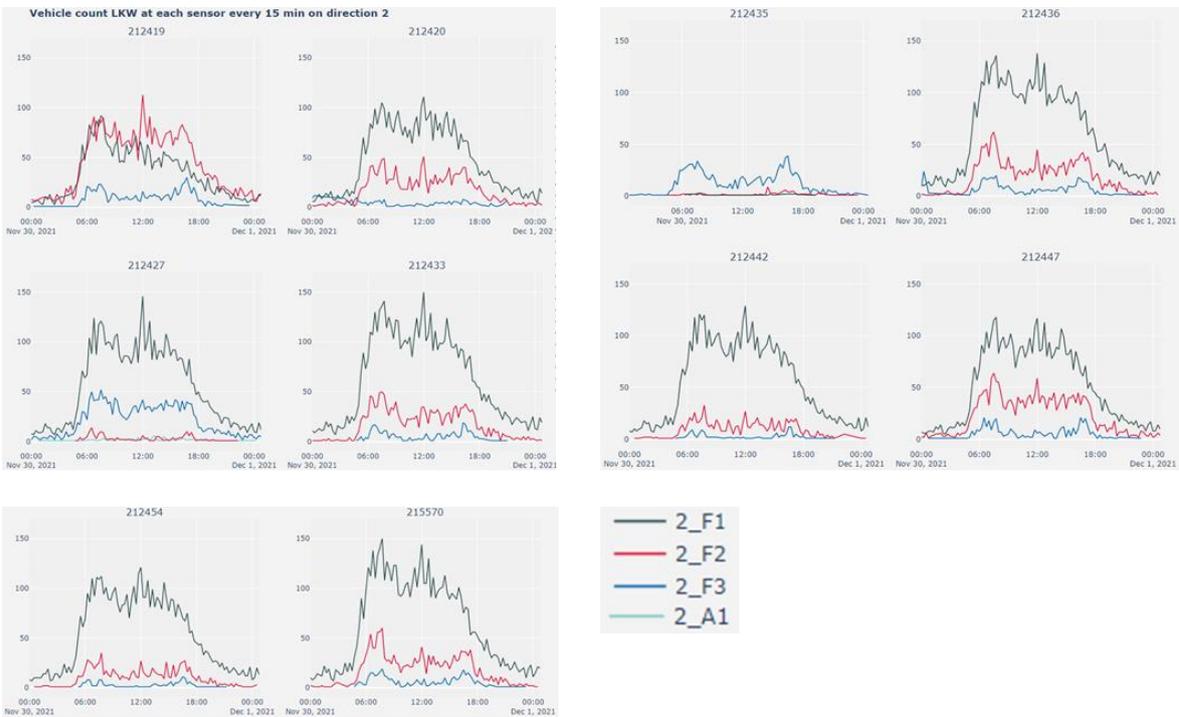


Abbildung 54: Fahrstreifenfein LKW Verkehrsstärkeganglinien Fahrtrichtung Wien - 30.11.2021 – 15min Intervall

5.2. Geschwindigkeitsganglinien Per Vehicle Data – 30.11.2021

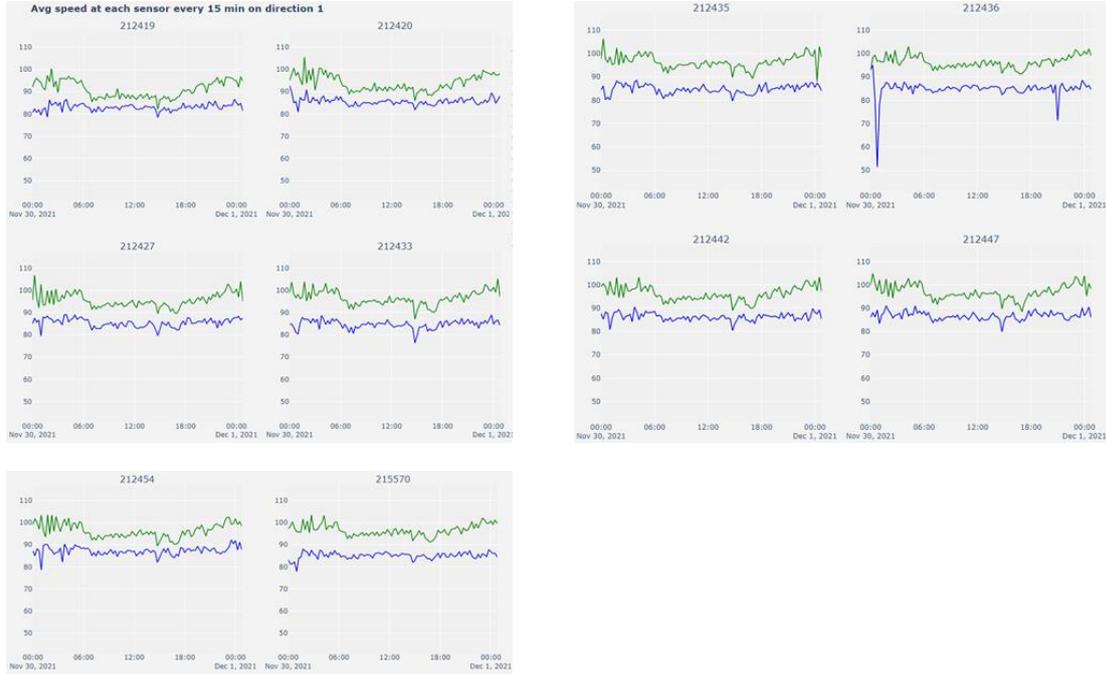


Abbildung 55: PKW und LKW Geschwindigkeitsganglinien Fahrtrichtung Klagenfurt - 30.11.2021 – 15min Intervall

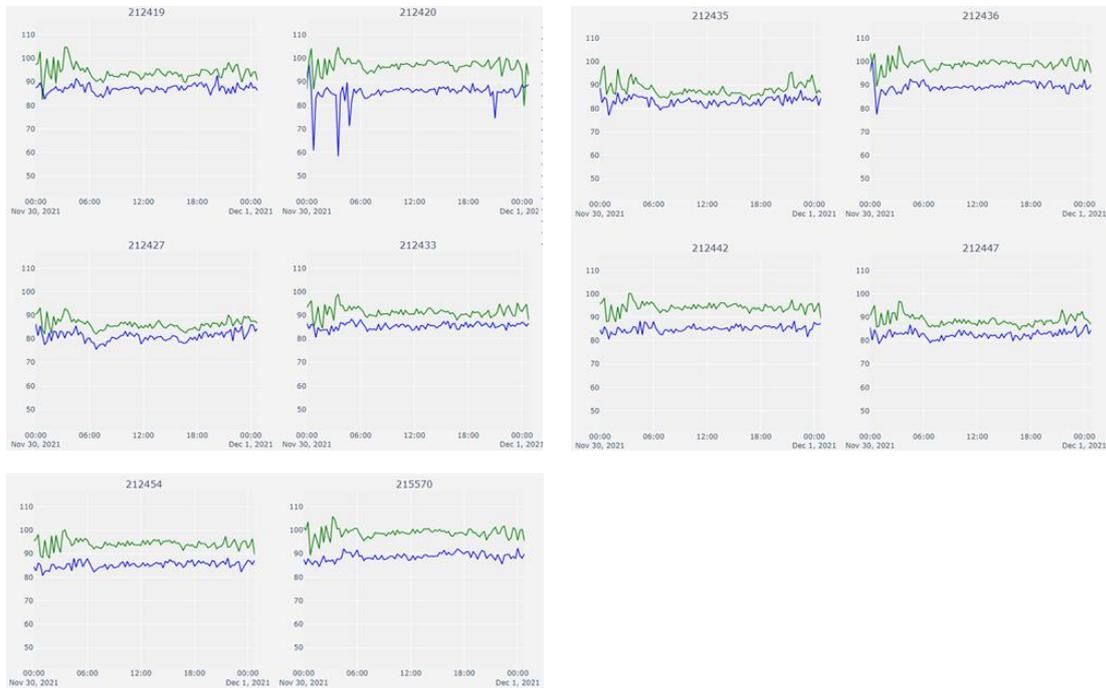


Abbildung 56: PKW und LKW Geschwindigkeitsganglinien Fahrtrichtung Wien - 30.11.2021 – 15min Intervall

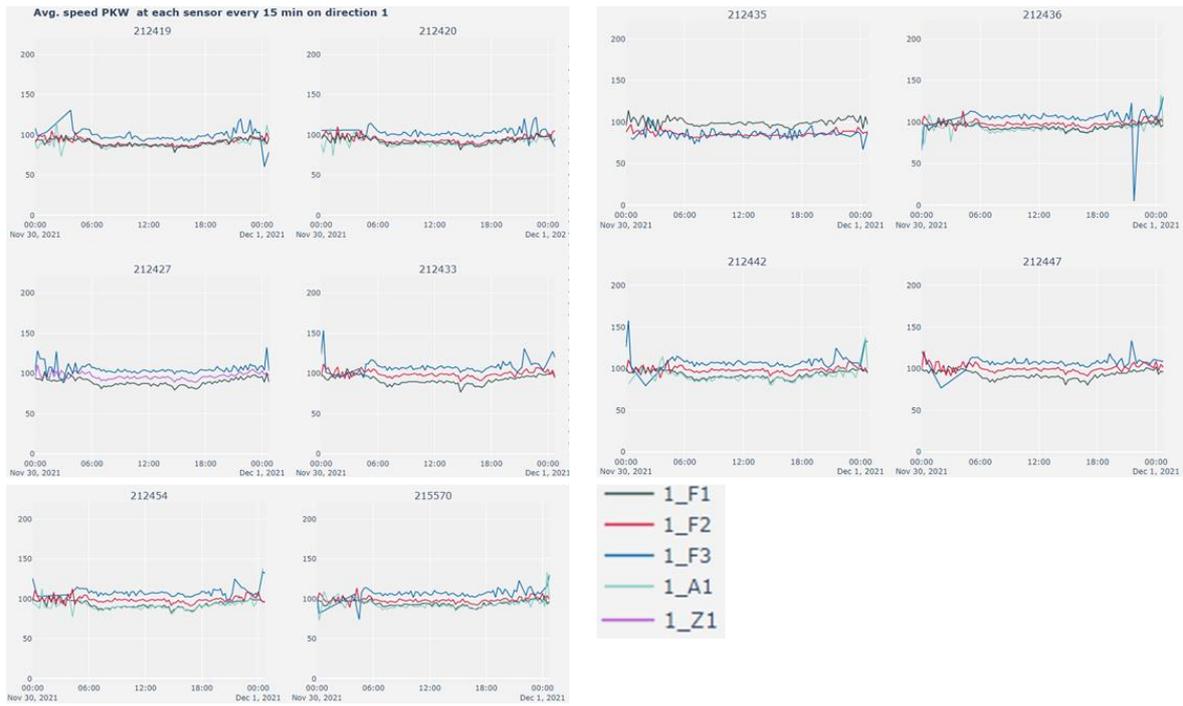


Abbildung 57: Fahrstreifenfeine PKW Geschwindigkeitsganglinien Fahrtrichtung Klagenfurt - 30.11.2021 – 15min Intervall

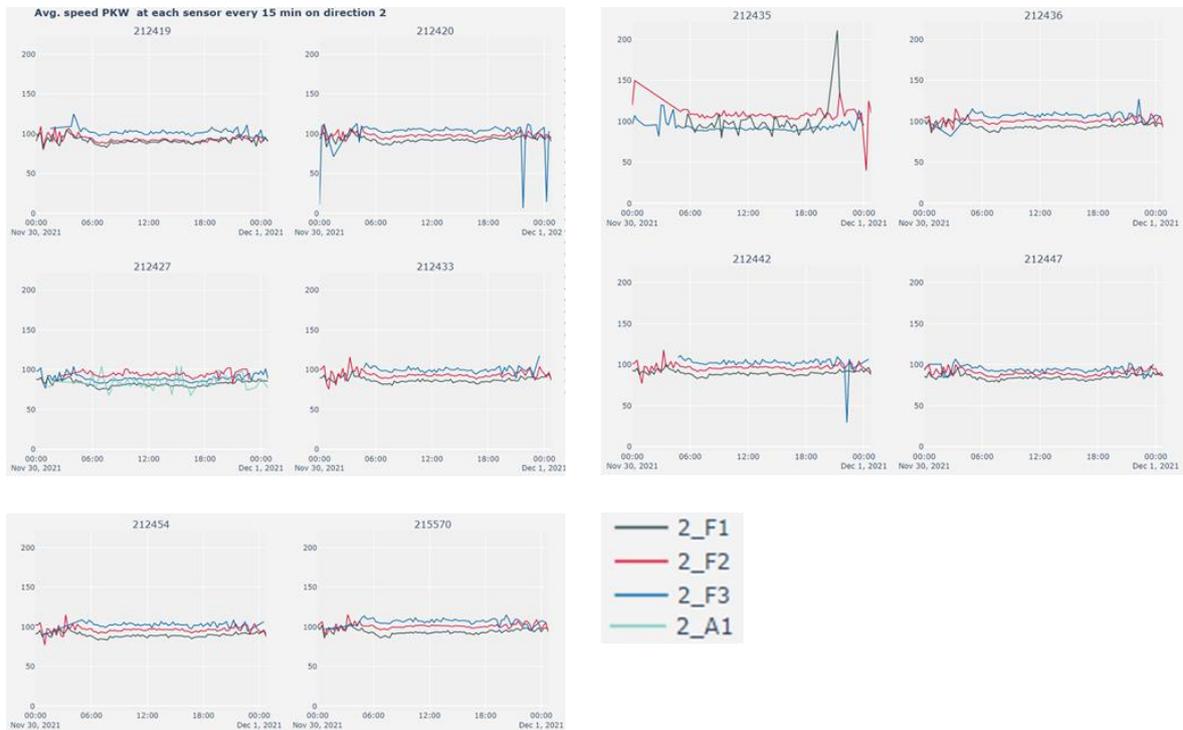


Abbildung 58: Fahrstreifenfeine PKW Geschwindigkeitsganglinien Fahrtrichtung Wien - 30.11.2021 – 15min Intervall

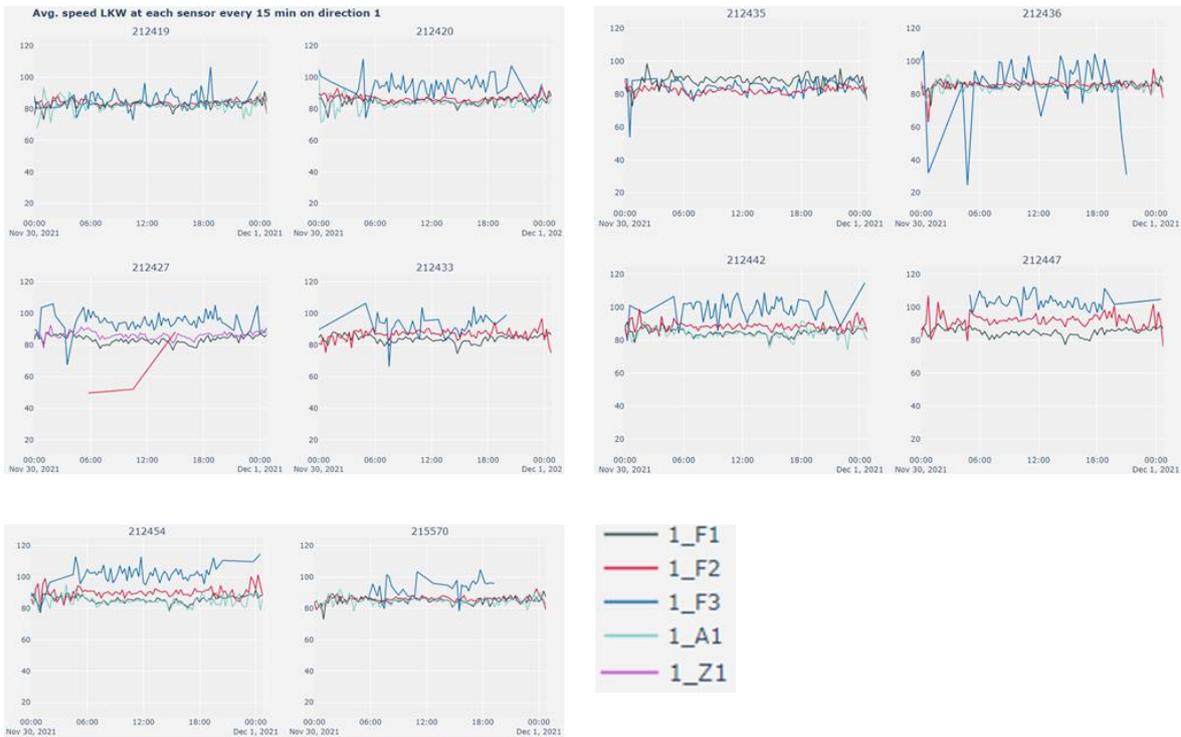


Abbildung 59: Fahrstreifenfeine LKW Geschwindigkeitsganglinien Fahrtrichtung Klagenfurt - 30.11.2021 – 15min Intervall

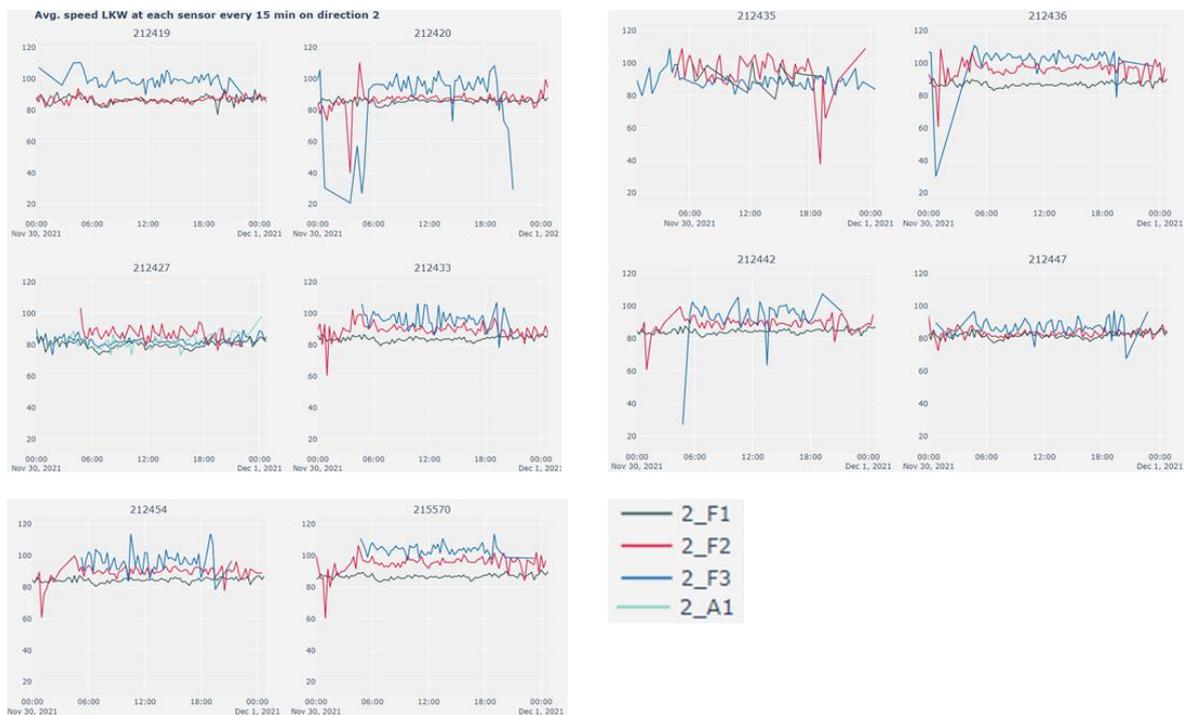


Abbildung 60: Fahrstreifenfeine LKW Geschwindigkeitsganglinien Fahrtrichtung Wien - 30.11.2021 – 15min Intervall

5.3. Verkehrsstärken-/Geschwindigkeitsganglinien Per Vehicle Data – 30.11.2021

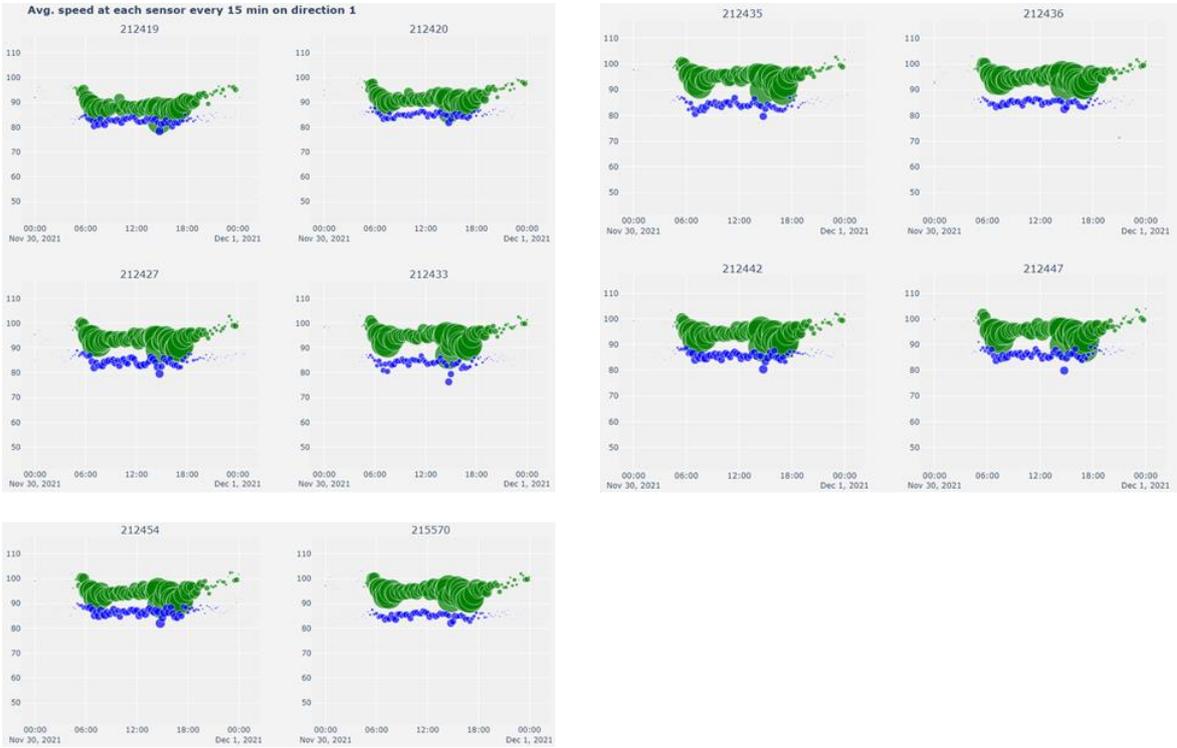


Abbildung 61: PKW und LKW Verkehrsstärken-/Geschwindigkeitsganglinien Fahrtrichtung Klagenfurt - 30.11.2021 – 15min Intervall

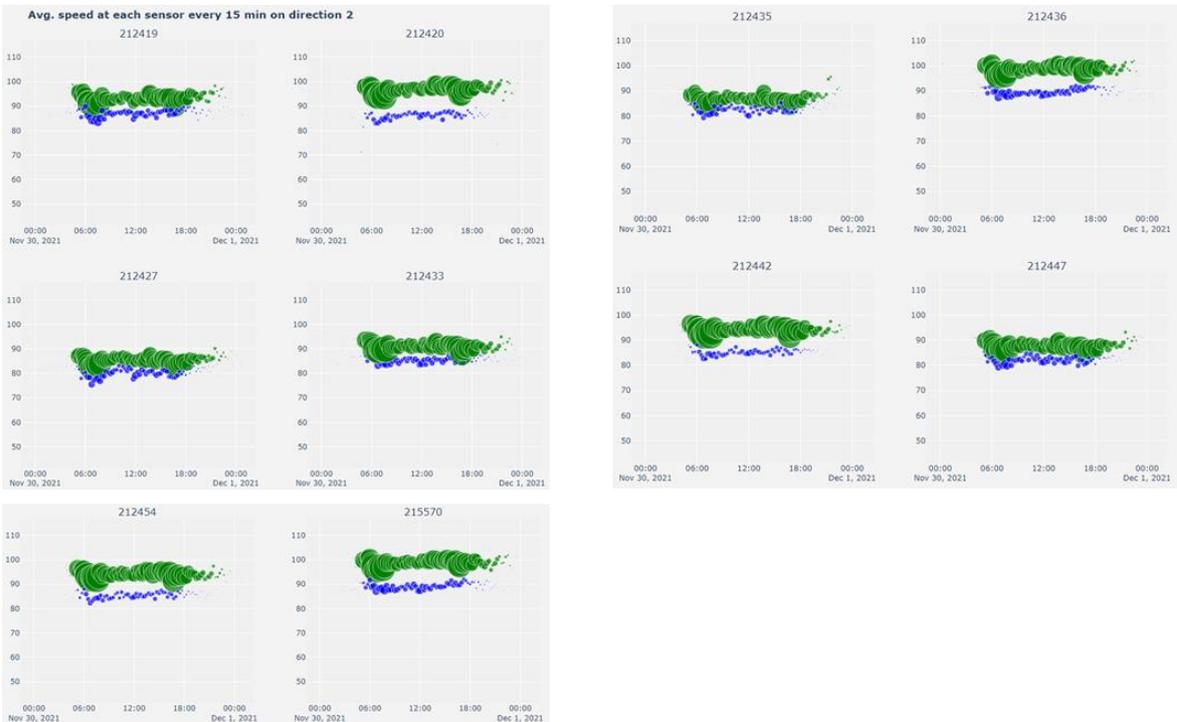


Abbildung 62: PKW und LKW Verkehrsstärken-/Geschwindigkeitsganglinien Fahrtrichtung Wien - 30.11.2021 – 15min Intervall

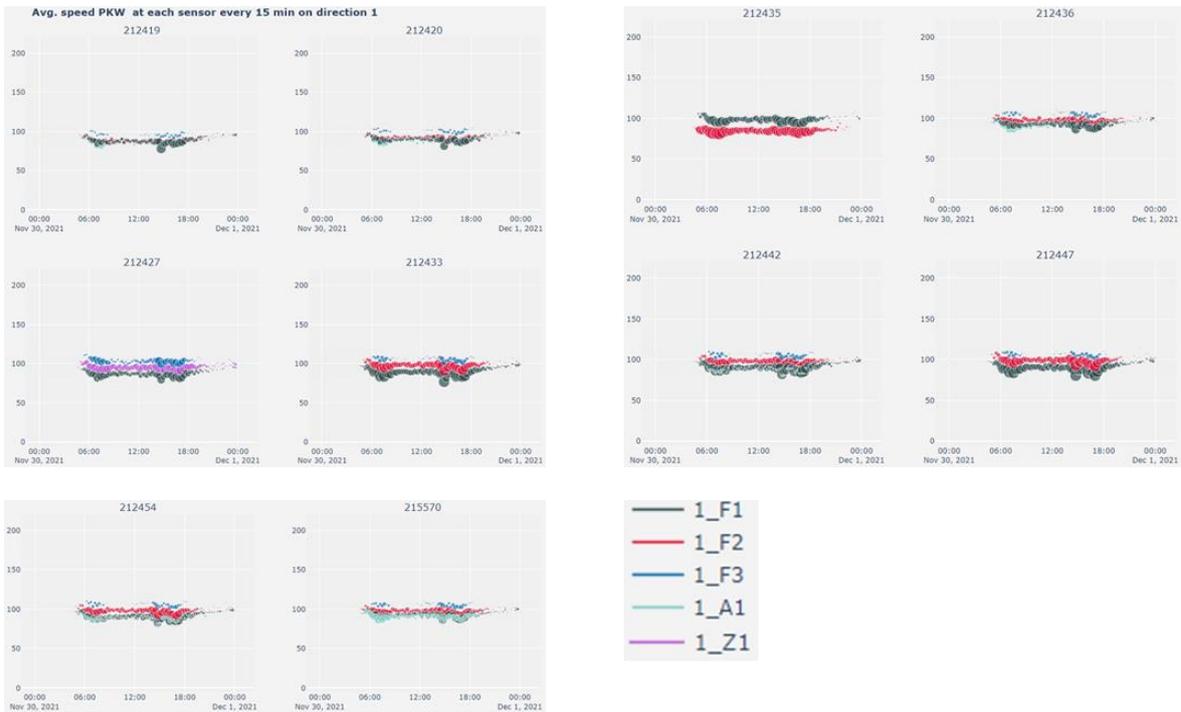


Abbildung 63: Fahrstreifenfeine PKW Verkehrsstärken-/Geschwindigkeitsganglinien Fahrtrichtung Klagenfurt - 30.11.2021 – 15min Intervall

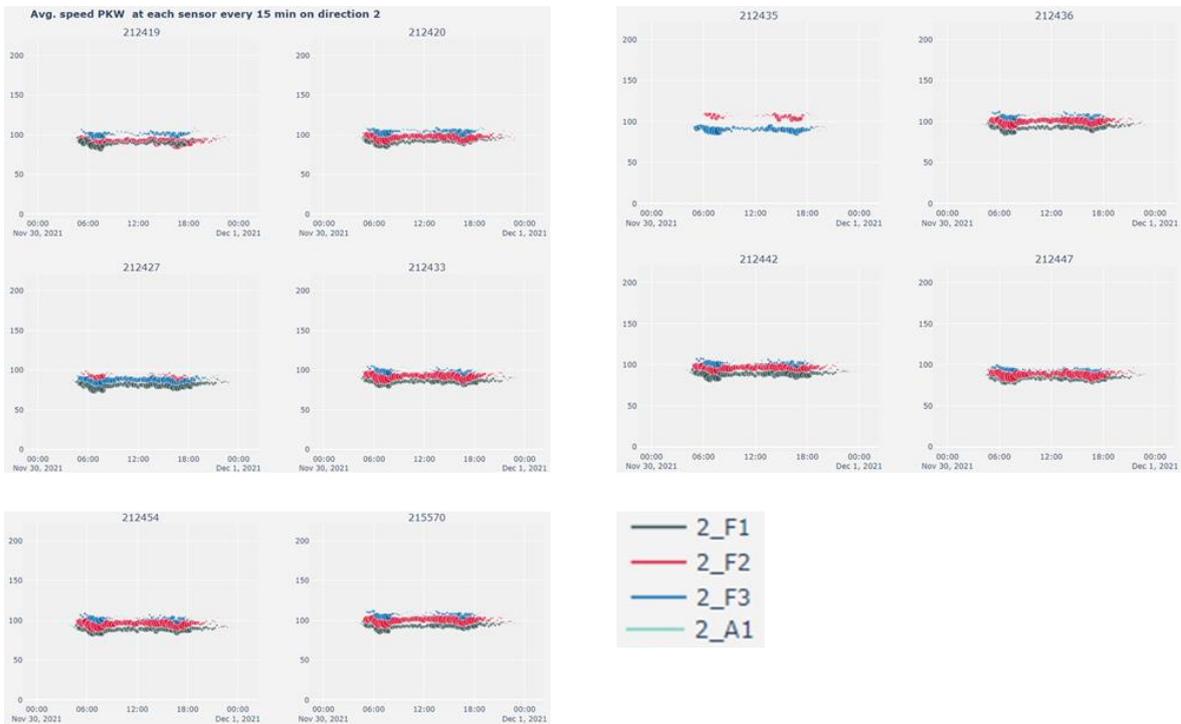


Abbildung 64: Fahrstreifenfeine PKW Verkehrsstärken-/Geschwindigkeitsganglinien Fahrtrichtung Wien - 30.11.2021 – 15min Intervall

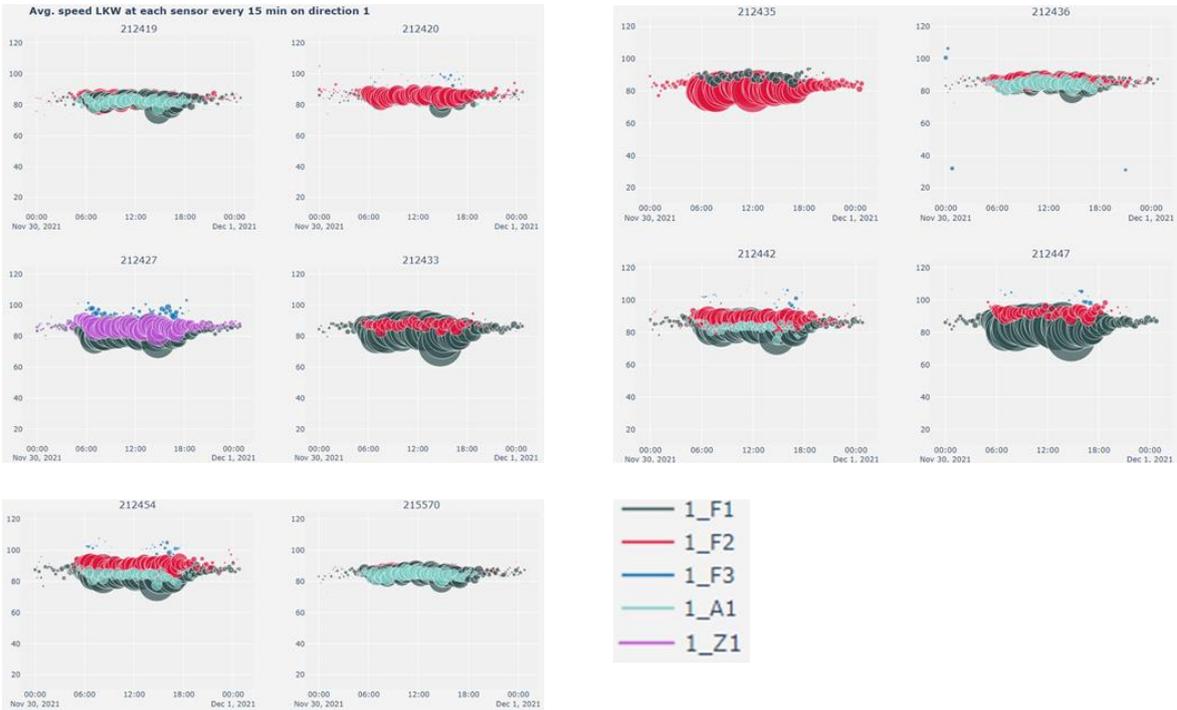


Abbildung 65: Fahrstreifenfeine LKW Verkehrsstärken-/Geschwindigkeitsganglinien Fahrtrichtung Klagenfurt - 30.11.2021 – 15min Intervall

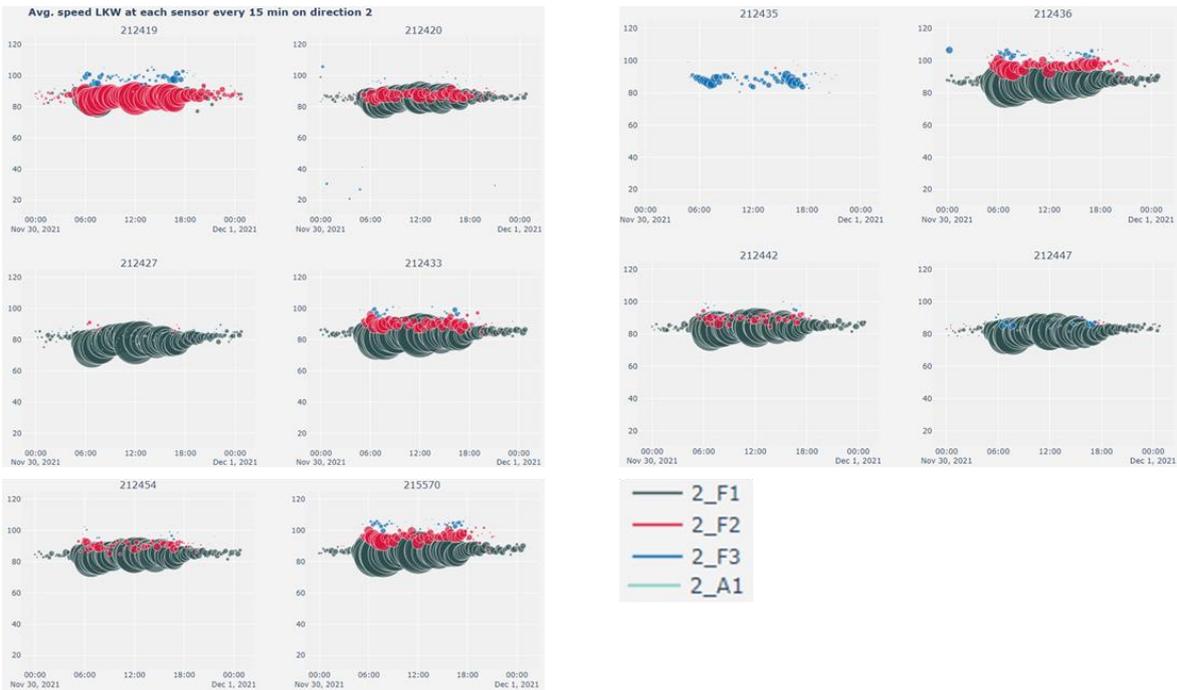


Abbildung 66: Fahrstreifenfeine LKW Verkehrsstärken-/Geschwindigkeitsganglinien Fahrtrichtung Wien - 30.11.2021 – 15min Intervall

5.4. Vergleich Smartmicro Radardaten vs. EFZ Einzelfahrzeugdaten

5.4.1. 29.09.2021 - 15 Minuten Intervall

All

ClientID	Total Count SM	Total Count EFZ	Total Difference	MAE Counts	Max Error Counts	MAE %	Max Error %	Mean Diff Counts	Mean Diff %	Sum Error Counts
212419	35335	41304	5969	67.08	244	11.92	27.03	64.88	8.08	6171
212420	36274	42140	5866	64.29	214	11.04	23.19	63.76	9.91	5912
212433	40163	41708	-1545	18.77	81	3.81	21.62	19.79	1.36	1727
212435	37882	41338	3456	38.39	152	8.27	18.14	37.57	5.26	3524
212436	36666	40813	4147	46.64	187	9.96	19.66	45.68	5.57	4309
212454	35985	40295	4229	45.48	163	8.43	22.64	45.87	6.86	4276

Nighttime (20:00-6:00)										
ClientID	Total Count SM	Total Count EFZ	Total Difference	MAE Counts	Max Error Counts	MAE %	Max Error %	Mean Diff Counts	Mean Diff %	Sum Error Counts
212419	4921	4939	18	8.11	37	8.22	27.03	0.50	-3.34	220
212420	5009	5314	305	9.75	62	5.47	22.85	8.47	2.60	351
212433	5047	4977	-70	3.11	10	3.49	21.62	-1.94	-2.76	112
212435	4872	4924	52	3.33	18	2.43	8.47	1.44	-0.16	120
212436	4859	4825	-34	3.56	16	3.70	12.82	-0.94	-2.66	128
212454	4916	5081	165	8.14	35	4.39	14.81	4.58	0.37	221

Daytime (9:00-14:00)										
ClientID	Total Count SM	Total Count EFZ	Total Difference	MAE Counts	Max Error Counts	MAE %	Max Error %	Mean Diff Counts	Mean Diff %	Sum Error Counts
212419	9591	10936	1345	67.25	114	12.30	18.87	67.25	12.30	1345
212420	9887	11476	1589	79.45	123	13.78	17.92	79.45	13.78	1589
212433	10775	11083	308	15.40	29	2.76	5.14	15.40	2.76	308
212435	10198	10972	804	40.20	64	7.36	10.59	40.20	7.36	804
212436	9934	10916	982	49.10	78	9.00	15.15	49.10	9.00	982
212454	8804	10906	1102	55.10	128	9.95	18.34	55.10	9.95	1102

Morning (6:00-9:00)										
ClientID	Total Count SM	Total Count EFZ	Total Difference	MAE Counts	Max Error Counts	MAE %	Max Error %	Mean Diff Counts	Mean Diff %	Sum Error Counts
212419	6764	8187	1403	119.92	180	16.72	21.92	116.62	16.72	1403
212420	8356	9962	1606	133.83	214	15.87	21.23	133.83	15.87	1606
212433	7903	8293	390	32.50	56	4.47	8.81	32.50	4.47	390
212435	7466	8238	772	64.33	102	9.09	12.58	64.33	9.09	772
212436	7158	8075	917	76.42	117	11.12	14.77	76.42	11.12	917
212454	8442	9520	1078	89.83	149	10.90	15.39	89.83	10.90	1078

Afternoon (14:00-20:00)										
ClientID	Total Count SM	Total Count EFZ	Total Difference	MAE Counts	Max Error Counts	MAE %	Max Error %	Mean Diff Counts	Mean Diff %	Sum Error Counts
212419	14639	17242	3203	133.46	244	17.36	24.90	133.46	17.36	3203
212420	13022	15388	2366	98.58	176	14.87	23.19	98.58	14.87	2366
212433	16438	17265	827	38.21	91	4.92	9.89	38.21	4.92	917
212435	15376	17264	1888	78.17	152	9.74	18.14	78.17	9.74	1828
212436	14715	16097	2382	95.08	167	13.36	19.66	95.08	13.36	2382
212454	13223	14698	1475	78.12	163	12.00	22.64	78.12	12.00	1475

Timeframe: 29.09.2021 03:00 – 30.09.2021 02:00

Abbildung 67: Vergleich Smartmicro Radardaten vs. EFZ Einzelfahrzeugdaten – Gesamtverkehr 29.09.2021 – 15min Intervall

ClientID	Total Count SM	Total Count EFZ	Total Difference	MAE Counts	Max Error Counts	MAE %	Max Error %	Mean Diff Counts	Mean Diff %	Sum Error Counts
212419	27353	35016	7663	84.25	284	16.56	33.29	83.29	13.74	7751
212420	29349	35824	6475	70.53	249	14.56	28.34	70.38	13.99	6489
212433	32150	35667	3517	38.58	135	7.92	20.90	38.23	7.07	3549
212435	30915	35374	4459	48.60	186	9.40	20.95	48.47	8.82	4479
212436	29733	34826	5093	55.88	220	10.77	26.96	55.36	9.45	5141
212454	29161	33843	4682	51.46	187	11.45	24.28	50.89	9.34	4734

Nighttime (20:00-6:00)										
ClientID	Total Count SM	Total Count EFZ	Total Difference	MAE Counts	Max Error Counts	MAE %	Max Error %	Mean Diff Counts	Mean Diff %	Sum Error Counts
212419	3933	4198	265	7.25	58	6.44	29.41	4.81	-0.83	261
212420	4141	4556	415	11.81	69	6.12	20.45	11.53	6.63	425
212433	4048	4186	138	4.72	25	4.37	20.00	3.83	2.22	170
212435	3978	4131	153	4.81	31	3.90	12.50	4.25	2.41	173
212436	3975	4053	78	3.50	25	3.54	13.64	2.17	0.15	126
212454	4052	4309	257	8.58	51	7.13	16.67	7.14	1.74	309

Daytime (9:00-14:00)										
ClientID	Total Count SM	Total Count EFZ	Total Difference	MAE Counts	Max Error Counts	MAE %	Max Error %	Mean Diff Counts	Mean Diff %	Sum Error Counts
212419	6944	8770	1826	91.30	136	20.76	27.25	91.30	20.76	1826
212420	7514	9329	1815	90.75	143	19.39	23.27	90.75	19.39	1815
212433	8124	9003	879	43.95	65	9.78	14.57	43.95	9.78	879
212435	7923	8916	993	49.65	75	11.15	16.22	49.65	11.15	993
212436	7819	8855	1036	61.80	86	13.99	21.61	61.80	13.99	1036
212454	7491	8821	1330	55.50	126	12.90	21.28	55.50	12.90	1330

Morning (6:00-9:00)										
ClientID	Total Count SM	Total Count EFZ	Total Difference	MAE Counts	Max Error Counts	MAE %	Max Error %	Mean Diff Counts	Mean Diff %	Sum Error Counts
212419	5361	7092	1731	144.25	202	23.94	29.24	144.25	23.94	1731
212420	6768	8631	1863	155.25	249	21.29	28.07	155.25	21.29	1863
212433	6447	7252	805	87.08	110	10.68	15.07	87.08	10.68	805
212435	6198	7223	1025	85.42	128	13.75	17.91	85.42	13.75	1025
212436	5911	7041	1130	94.17	136	15.73	20.51	94.17	15.73	1130
212454	6790	8104	1314	109.50	187	15.55	22.48	109.50	15.55	1314

Afternoon (14:00-20:00)										
ClientID	Total Count SM	Total Count EFZ	Total Difference	MAE Counts	Max Error Counts	MAE %	Max Error %	Mean Diff Counts	Mean Diff %	Sum Error Counts
212419	11115	15048	3933	163.88	284	24.64	33.29	163.88	24.64	3933
212420	10926	13308	2382	99.42	189	16.93	28.34	99.25	16.89	2388
212433	13531	15229	1698	70.62	135	10.30	17.33	70.62	10.30	1695
212435	12816	15104	2288	95.33	186	14.01	20.95	95.33	14.01	2288
212436	12228	14877	2649	110.38	220	16.46	26.06	110.38	16.46	2649
212454	10828	12809	1981	82.54	151	14.87	24.28	82.54	14.87	1981

Timeframe: 29.09.2021 03:00 – 30.09.2021 02:00

Abbildung 68: Vergleich Smartmicro Radardaten vs. EFZ Einzelfahrzeugdaten – PKW-Verkehr 29.09.2021 – 15min Intervall

All

clientid	Total Count SM	Total Count EFZ	Total Difference	MAE Counts	Max Error Counts	MAE %	Max Error %	Mean Diff Counts	Mean Diff %	Sum Error Counts
212419	7982	6288	-1694	18.72	50	25.84	70.18	-18.41	-24.37	1722
212420	6925	6316	-609	11.51	152	17.86	66.09	-6.62	-13.47	1059
212433	8013	6041	-1972	21.46	55	30.73	75.00	-21.43	-30.60	1974
212435	6967	5964	-1003	11.12	39	16.46	52.38	-10.90	-16.20	1023
212436	6933	5967	-966	10.41	33	17.16	50.00	-10.28	-16.34	958
212454	6824	6362	-462	7.33	38	12.05	42.86	-5.02	-8.04	674

Nighttime (20:00-6:00)											Daytime (9:00-14:00)										
clientid	Total Count SM	Total Count EFZ	Total Difference	MAE Counts	Max Error Counts	MAE %	Max Error %	Mean Diff Counts	Mean Diff %	Sum Error Counts	clientid	Total Count SM	Total Count EFZ	Total Difference	MAE Counts	Max Error Counts	MAE %	Max Error %	Mean Diff Counts	Mean Diff %	Sum Error Counts
212419	988	833	-155	4.75	21	20.46	54.55	-4.31	-16.96	171	212419	2647	2166	-481	24.65	48	23.04	36.99	-24.05	-22.54	493
212420	868	758	-110	3.67	15	20.53	60.00	-3.06	-16.50	132	212420	2373	2147	-226	11.30	32	10.88	32.65	-11.30	-10.98	226
212433	999	791	-208	5.83	27	25.97	75.00	-5.78	-25.65	210	212433	2651	2080	-571	28.55	37	27.89	41.43	-28.55	-27.89	571
212435	894	793	-101	2.86	13	13.08	50.00	-2.81	-12.68	103	212435	2245	2056	-189	10.35	22	10.07	20.00	-9.45	-9.19	207
212436	884	772	-112	3.44	10	17.78	50.00	-3.11	-15.70	124	212436	2315	2061	-254	12.70	28	12.43	21.71	-12.70	-12.43	254
212454	864	772	-92	3.17	17	14.47	42.86	-2.56	-6.40	114	212454	2313	2285	-28	6.50	15	5.61	16.13	-1.40	-1.34	130

Morning (6:00-9:00)											Afternoon (14:00-20:00)										
clientid	Total Count SM	Total Count EFZ	Total Difference	MAE Counts	Max Error Counts	MAE %	Max Error %	Mean Diff Counts	Mean Diff %	Sum Error Counts	clientid	Total Count SM	Total Count EFZ	Total Difference	MAE Counts	Max Error Counts	MAE %	Max Error %	Mean Diff Counts	Mean Diff %	Sum Error Counts
212419	1423	1095	-328	27.33	50	30.39	56.18	-27.33	-30.39	328	212419	2924	2194	-730	30.42	50	33.98	70.18	-30.42	-33.98	730
212420	1588	1331	-257	21.42	37	19.37	33.01	-21.42	-19.37	257	212420	2096	2080	-16	18.50	152	18.85	66.09	-6.67	-8.05	444
212433	1456	1041	-415	34.58	55	40.54	70.51	-34.58	-40.54	415	212433	2907	2129	-778	32.42	54	35.33	62.07	-32.42	-35.33	778
212435	1268	1015	-253	21.08	34	26.38	52.38	-21.08	-26.38	253	212435	2560	2100	-460	19.17	39	21.91	50.00	-19.17	-21.91	460
212436	1247	1034	-213	17.75	30	21.59	41.10	-17.75	-21.59	213	212436	2487	2120	-367	15.29	33	17.94	38.33	-15.29	-17.94	367
212454	1652	1416	-236	20.33	38	17.44	35.42	-19.67	-16.65	244	212454	1995	1889	-106	7.75	17	11.10	20.79	-4.42	-7.17	186

Timeframe: 29.09.2021 03:00 – 30.09.2021 02:00

Abbildung 69: Vergleich Smartmicro Radardaten vs. EFZ Einzelfahrzeugdaten – LKW-Verkehr 29.09.2021 – 15min Intervall

5.4.2. 18.11.2021 - 15 Minuten Intervall

All

clientid	Total Count SM	Total Count EFZ	Total Difference	MAE Counts	Max Error Counts	MAE %	Max Error %	Mean Diff Counts	Mean Diff %	Sum Error Counts
212419	35861	38831	2850	29.00	132	6.70	29.03	26.50	1.81	2900
212420	36852	39955	3103	32.45	111	8.03	35.29	31.03	4.50	3245
212433	38511	39224	713	9.05	52	2.60	18.57	7.13	0.40	905
212435	37492	38870	1378	15.34	82	3.54	12.12	13.78	1.13	1534
212436	37922	38408	486	11.06	73	4.31	23.33	4.86	-1.96	1106
212454	37567	37635	68	8.52	45	4.41	54.55	6.68	-2.97	852

Nighttime (20:00-6:00)											Daytime (9:00-14:00)										
clientid	Total Count SM	Total Count EFZ	Total Difference	MAE Counts	Max Error Counts	MAE %	Max Error %	Mean Diff Counts	Mean Diff %	Sum Error Counts	clientid	Total Count SM	Total Count EFZ	Total Difference	MAE Counts	Max Error Counts	MAE %	Max Error %	Mean Diff Counts	Mean Diff %	Sum Error Counts
212419	4900	4898	-2	3.59	12	5.88	29.03	-2.09	-8.23	150	212419	9620	10082	462	23.10	38	4.56	7.22	23.10	4.56	462
212420	5983	5206	-777	6.02	45	7.84	35.29	2.89	-0.19	265	212420	9912	10748	836	41.80	67	7.70	11.66	41.80	7.70	836
212433	4998	4959	-39	2.39	13	3.24	18.57	-0.59	-1.54	105	212433	10196	10263	67	5.35	20	1.04	4.02	3.25	0.62	107
212435	4940	4899	-41	2.25	8	3.23	12.12	-0.93	-2.17	99	212435	9880	10140	260	13.40	35	2.58	6.02	13.00	2.50	260
212436	5035	4816	-219	5.07	21	6.77	23.33	-4.08	-6.56	223	212436	10095	10184	89	8.55	28	1.86	4.82	4.45	0.83	171
212454	5039	4861	-178	4.09	18	7.37	54.55	-4.05	-7.21	180	212454	10139	10076	-63	9.25	21	1.85	4.72	-3.15	-0.75	185

Morning (6:00-9:00)											Afternoon (14:00-20:00)										
clientid	Total Count SM	Total Count EFZ	Total Difference	MAE Counts	Max Error Counts	MAE %	Max Error %	Mean Diff Counts	Mean Diff %	Sum Error Counts	clientid	Total Count SM	Total Count EFZ	Total Difference	MAE Counts	Max Error Counts	MAE %	Max Error %	Mean Diff Counts	Mean Diff %	Sum Error Counts
212419	6751	7403	652	54.33	111	8.46	14.45	54.33	8.46	652	212419	16020	16248	228	67.83	132	9.12	14.93	67.83	9.12	1628
212420	8582	9393	811	67.56	109	8.53	11.73	67.56	8.53	811	212420	13275	14608	1333	55.54	111	8.42	14.84	55.54	8.42	1333
212433	7329	7482	153	13.25	27	2.03	3.69	12.75	1.94	159	212433	15886	16520	634	22.25	52	2.99	6.21	22.25	2.99	634
212435	7127	7419	292	24.33	51	3.73	6.62	24.33	3.73	292	212435	15545	16412	867	36.46	82	4.81	10.01	36.12	4.73	875
212436	7147	7207	120	12.83	29	1.99	3.83	10.00	1.45	154	212436	15645	16141	496	23.25	73	3.16	8.26	20.67	2.42	558
212454	8830	8919	89	11.75	33	1.62	3.99	7.42	0.93	141	212454	13550	13779	220	14.42	45	2.52	5.47	9.17	1.00	346

Timeframe: 18.11.2021 00:00 – 19.11.2021 01:00

Abbildung 70: Vergleich Smartmicro Radardaten vs. EFZ Einzelfahrzeugdaten – Gesamtverkehr 18.11.2021 – 15min Intervall

All

clientId	Total Count SM	Total Count EFZ	Total Difference	MAE Counts	Max Error Counts	MAE %	Max Error %	Mean Diff Counts	Mean Diff %	Sum Error Counts
212419	28203	32659	4456	45.82	188	11.06	31.58	44.56	6.42	4582
212420	28858	33870	5212	52.26	168	15.17	50.00	52.12	14.50	5226
212433	30844	33460	2606	26.48	97	6.52	18.75	26.06	5.18	2648
212435	30390	33122	2732	27.72	107	6.53	15.11	27.32	5.43	2772
212436	30516	32761	2185	23.85	115	6.87	35.00	21.85	2.46	2385
212454	29808	30861	1173	13.69	90	4.50	30.77	11.73	0.90	1369

Nighttime (20:00-6:00)

clientId	Total Count SM	Total Count EFZ	Total Difference	MAE Counts	Max Error Counts	MAE %	Max Error %	Mean Diff Counts	Mean Diff %	Sum Error Counts
212419	3943	4208	265	4.34	35	6.99	31.50	1.48	-3.53	191
212420	3866	4338	472	11.05	65	14.42	50.00	10.73	12.91	466
212433	3988	4100	112	3.50	17	4.50	18.75	2.55	1.44	154
212435	3959	4045	86	2.86	18	3.96	11.76	1.95	1.48	126
212436	4020	3975	-45	3.34	12	6.26	35.00	-1.02	-3.70	147
212454	3891	3851	-40	2.77	13	5.03	30.77	-0.23	-2.70	122

Daytime (9:00-14:00)

clientId	Total Count SM	Total Count EFZ	Total Difference	MAE Counts	Max Error Counts	MAE %	Max Error %	Mean Diff Counts	Mean Diff %	Sum Error Counts
212419	7005	7907	902	45.10	60	11.38	14.12	45.10	11.38	902
212420	7248	8935	1387	69.35	95	16.15	22.11	69.35	16.15	1387
212433	7543	8152	609	30.45	43	7.50	10.72	30.45	7.50	609
212435	7416	8034	618	30.90	45	7.63	10.34	30.90	7.63	618
212436	7520	8116	597	29.35	47	7.23	10.61	29.35	7.23	587
212454	7595	7744	149	10.35	30	2.60	6.41	7.45	1.73	207

Morning (6:00-9:00)

clientId	Total Count SM	Total Count EFZ	Total Difference	MAE Counts	Max Error Counts	MAE %	Max Error %	Mean Diff Counts	Mean Diff %	Sum Error Counts
212419	5367	6428	1061	88.42	155	16.15	22.56	88.42	16.15	1061
212420	6051	7925	1874	106.17	168	15.96	20.69	106.17	15.96	1274
212433	6014	6582	568	45.67	64	8.23	10.53	45.67	8.23	548
212435	5914	6495	581	48.42	89	8.69	12.82	48.42	8.69	581
212436	5802	6354	492	41.00	67	7.59	9.76	41.00	7.59	492
212454	6996	7388	372	31.00	59	4.87	7.54	31.00	4.87	372

Afternoon (14:00-20:00)

clientId	Total Count SM	Total Count EFZ	Total Difference	MAE Counts	Max Error Counts	MAE %	Max Error %	Mean Diff Counts	Mean Diff %	Sum Error Counts
212419	11888	14319	2428	101.17	188	15.08	22.95	101.17	15.08	2428
212420	10893	12972	2079	86.62	153	15.32	22.24	86.62	15.32	2079
212433	12099	14838	1337	55.71	97	8.57	11.94	55.71	8.57	1337
212435	13101	14548	1447	60.29	107	9.27	15.11	60.29	9.27	1447
212436	13105	14256	1151	48.29	115	7.33	14.58	47.99	7.21	1159
212454	11326	11988	662	27.83	90	4.91	12.15	27.58	4.83	668

Timeframe: 18.11.2021 00:00 – 19.11.2021 01:00

Abbildung 71: Vergleich Smartmicro Radardaten vs. EFZ Einzelfahrzeugdaten – PKW-Verkehr 18.11.2021 – 15min Intervall

All

clientId	Total Count SM	Total Count EFZ	Total Difference	MAE Counts	Max Error Counts	MAE %	Max Error %	Mean Diff Counts	Mean Diff %	Sum Error Counts
212419	7778	9972	-2194	18.24	65	28.62	62.76	-18.06	-26.33	1824
212420	8194	6085	-2109	21.09	83	41.10	122.22	-21.09	-41.10	2109
212433	7667	5774	-1893	18.97	63	27.80	75.00	-18.93	-27.35	1897
212435	7192	5748	-1454	13.58	40	21.78	57.89	-13.54	-21.49	1358
212436	7406	5707	-1699	17.17	52	28.20	63.04	-16.99	-27.82	1717
212454	7759	6654	-1105	11.21	45	19.73	87.50	-11.05	-19.01	1121

Nighttime (20:00-6:00)

clientId	Total Count SM	Total Count EFZ	Total Difference	MAE Counts	Max Error Counts	MAE %	Max Error %	Mean Diff Counts	Mean Diff %	Sum Error Counts
212419	1047	890	-157	3.98	25	19.06	57.14	-3.57	-15.21	175
212420	1217	868	-349	7.93	27	46.00	122.22	-7.93	-46.00	349
212433	1010	859	-151	3.52	16	15.71	53.33	-3.43	-15.12	155
212435	961	854	-107	2.96	13	14.76	49.00	-2.89	-14.10	131
212436	1015	841	-174	4.05	20	21.24	54.55	-3.95	-20.88	178
212454	1148	980	-168	4.09	15	20.46	87.50	-3.82	-18.90	180

Daytime (9:00-14:00)

clientId	Total Count SM	Total Count EFZ	Total Difference	MAE Counts	Max Error Counts	MAE %	Max Error %	Mean Diff Counts	Mean Diff %	Sum Error Counts
212419	2615	2175	-440	22.00	39	20.21	31.00	-22.00	-20.21	440
212420	2684	2113	-571	27.55	35	26.44	37.63	-27.55	-26.44	551
212433	2655	2111	-544	27.20	37	26.11	38.54	-27.20	-26.11	544
212435	2464	2106	-358	17.90	27	17.17	20.09	-17.90	-17.17	358
212436	2596	2068	-528	24.90	40	24.26	40.00	-24.90	-24.26	498
212454	2544	2332	-212	10.80	26	9.28	24.53	-10.80	-9.28	212

Morning (6:00-9:00)

clientId	Total Count SM	Total Count EFZ	Total Difference	MAE Counts	Max Error Counts	MAE %	Max Error %	Mean Diff Counts	Mean Diff %	Sum Error Counts
212419	1384	975	-409	34.08	48	44.31	82.76	-34.08	-44.31	409
212420	1931	1488	-443	38.58	63	32.21	54.31	-38.58	-32.21	463
212433	1315	920	-395	32.82	44	44.67	62.50	-32.82	-44.67	395
212435	1213	924	-289	24.08	36	33.54	54.76	-24.08	-33.54	289
212436	1285	913	-372	31.00	44	42.25	55.70	-31.00	-42.25	372
212454	1834	1551	-283	23.92	36	18.97	32.10	-23.98	-18.66	287

Afternoon (14:00-20:00)

clientId	Total Count SM	Total Count EFZ	Total Difference	MAE Counts	Max Error Counts	MAE %	Max Error %	Mean Diff Counts	Mean Diff %	Sum Error Counts
212419	2732	1932	-800	33.33	65	42.84	70.59	-33.33	-42.84	800
212420	2382	1636	-746	31.08	52	48.63	100.00	-31.08	-48.63	746
212433	2087	1884	-203	33.46	63	42.12	75.00	-33.46	-42.12	803
212435	2444	1884	-560	24.17	40	32.63	57.89	-24.17	-32.63	560
212436	2540	1885	-655	27.88	52	37.19	63.04	-27.29	-36.68	659
212454	2233	1791	-442	18.42	45	27.49	56.72	-18.42	-27.49	442

Timeframe: 18.11.2021 00:00 – 19.11.2021 01:00

Abbildung 72: Vergleich Smartmicro Radardaten vs. EFZ Einzelfahrzeugdaten – LKW-Verkehr 18.11.2021 – 15min Intervall

5.4.3. 30.11.2021 - 15 Minuten Intervall

All

clientId	Total Count SM	Total Count EFZ	Total Difference	MAE Counts	Max Error Counts	MAE %	Max Error %	Mean Diff Counts	Mean Diff %	Sum Error Counts
212419	32793	34386	1593	20.07	90	5.59	23.81	15.93	0.15	2007
212420	31820	33953	2133	22.93	103	7.69	50.00	21.33	3.18	2293
212433	34383	34957	574	7.94	51	2.42	14.04	5.74	0.29	794
212436	34788	34124	-664	10.94	47	6.01	50.00	-6.44	-5.25	1094
212454	32150	32190	-50	6.30	31	3.09	19.05	-0.50	-2.04	630

Nighttime (20:00-6:00)											Daytime (9:00-14:00)										
clientId	Total Count SM	Total Count EFZ	Total Difference	MAE Counts	Max Error Counts	MAE %	Max Error %	Mean Diff Counts	Mean Diff %	Sum Error Counts	clientId	Total Count SM	Total Count EFZ	Total Difference	MAE Counts	Max Error Counts	MAE %	Max Error %	Mean Diff Counts	Mean Diff %	Sum Error Counts
212419	4206	4074	-132	4.32	15	6.17	23.81	-3.00	-5.52	190	212419	8887	9030	143	10.65	33	2.34	8.09	7.15	1.55	213
212420	4533	4618	85	5.57	34	8.93	50.00	1.93	-1.31	245	212420	8447	9044	597	29.85	63	6.63	12.70	29.85	6.63	597
212433	4173	4155	-18	1.82	8	2.31	14.04	-0.41	-1.31	80	212433	9156	9210	54	6.70	18	1.48	4.29	2.70	0.56	134
212436	4348	4021	-327	7.48	24	10.96	50.00	-7.43	-9.92	329	212436	9357	9106	-251	14.75	42	3.28	9.31	-12.55	-2.79	295
212454	4450	4340	-110	2.82	14	4.56	19.05	-2.50	-4.43	124	212454	8527	8483	-44	8.10	18	1.92	3.88	-3.20	-0.82	182

Morning (6:00-9:00)											Afternoon (14:00-20:00)										
clientId	Total Count SM	Total Count EFZ	Total Difference	MAE Counts	Max Error Counts	MAE %	Max Error %	Mean Diff Counts	Mean Diff %	Sum Error Counts	clientId	Total Count SM	Total Count EFZ	Total Difference	MAE Counts	Max Error Counts	MAE %	Max Error %	Mean Diff Counts	Mean Diff %	Sum Error Counts
212419	6978	7549	571	47.58	89	7.26	11.41	47.58	7.26	571	212419	12722	13733	1011	43.04	90	6.40	12.40	42.12	6.01	1033
212420	7592	8307	715	59.56	103	8.52	13.09	59.56	8.52	715	212420	11248	11984	736	30.97	90	5.88	12.82	30.97	5.88	736
212433	7493	7665	172	17.33	35	2.58	4.87	16.00	2.30	208	212433	13561	13907	346	15.50	51	2.41	6.09	14.42	1.98	372
212436	7507	7440	-67	12.58	35	2.17	7.34	-5.56	-1.12	151	212436	13556	13557	1	13.29	47	2.78	7.39	0.04	-0.81	319
212454	7846	7944	98	10.83	26	1.60	3.16	8.17	1.18	130	212454	11327	11353	26	8.92	31	2.13	6.25	1.08	-0.27	214

Timeframe: 30.11.2021 00:00 – 01.12.2021 01:00

Abbildung 73: Vergleich Smartmicro Radardaten vs. EFZ Einzelfahrzeugdaten – Gesamtverkehr 30.11.2021 – 15min Intervall

All

clientId	Total Count SM	Total Count EFZ	Total Difference	MAE Counts	Max Error Counts	MAE %	Max Error %	Mean Diff Counts	Mean Diff %	Sum Error Counts
212419	23902	27329	3427	35.61	146	10.10	50.00	34.27	4.88	3561
212420	25020	28885	3865	36.87	129	13.52	52.63	36.85	12.53	3867
212433	26188	28132	1944	19.84	91	5.94	16.67	19.44	4.69	1984
212436	26324	27387	1063	14.03	87	5.75	30.00	10.63	0.40	1403
212454	25694	26457	763	9.99	42	4.38	40.00	7.63	0.06	999

Nighttime (20:00-6:00)											Daytime (9:00-14:00)										
clientId	Total Count SM	Total Count EFZ	Total Difference	MAE Counts	Max Error Counts	MAE %	Max Error %	Mean Diff Counts	Mean Diff %	Sum Error Counts	clientId	Total Count SM	Total Count EFZ	Total Difference	MAE Counts	Max Error Counts	MAE %	Max Error %	Mean Diff Counts	Mean Diff %	Sum Error Counts
212419	3056	3055	-9	3.25	24	7.90	50.00	0.20	-4.85	143	212419	5882	6510	628	31.40	49	9.59	15.41	31.40	9.59	628
212420	3491	3858	367	8.84	57	14.81	52.63	8.34	11.77	389	212420	6189	7195	1006	50.30	80	14.02	19.00	50.30	14.02	1006
212433	3086	3182	96	3.09	24	4.71	16.67	2.18	1.89	136	212433	6347	6782	435	21.75	36	6.41	11.69	21.75	6.41	435
212436	3161	3069	-92	2.95	12	7.98	30.00	-2.99	-3.87	130	212436	6552	6704	202	12.40	26	3.69	8.00	10.10	2.94	248
212454	3514	3498	-16	2.14	12	5.39	40.00	-0.36	-3.35	94	212454	6381	6477	96	8.90	27	2.81	9.74	4.80	1.34	178

Morning (6:00-9:00)											Afternoon (14:00-20:00)										
clientId	Total Count SM	Total Count EFZ	Total Difference	MAE Counts	Max Error Counts	MAE %	Max Error %	Mean Diff Counts	Mean Diff %	Sum Error Counts	clientId	Total Count SM	Total Count EFZ	Total Difference	MAE Counts	Max Error Counts	MAE %	Max Error %	Mean Diff Counts	Mean Diff %	Sum Error Counts
212419	5177	6174	997	63.88	146	15.47	22.15	63.88	15.47	997	212419	9787	11580	1793	74.71	148	13.50	20.08	74.71	13.50	1793
212420	6089	7058	969	80.75	129	13.62	19.63	80.75	13.62	969	212420	6251	10674	1323	55.12	121	12.14	19.19	55.12	12.14	1323
212433	5846	6343	497	41.42	73	7.61	11.85	41.42	7.61	497	212433	10909	11625	916	38.17	91	6.95	12.99	38.17	6.95	916
212436	5783	6115	332	29.50	56	5.50	9.17	27.67	4.97	354	212436	10878	11409	621	27.96	87	5.14	14.45	25.88	4.06	671
212454	6388	6692	306	25.50	40	4.40	6.50	25.50	4.40	306	212454	9413	9790	377	17.54	42	3.99	9.16	15.71	3.07	421

Timeframe: 30.11.2021 00:00 – 01.12.2021 01:00

Abbildung 74: Vergleich Smartmicro Radardaten vs. EFZ Einzelfahrzeugdaten – PKW-Verkehr 30.11.2021 – 15min Intervall

All

clientId	Total Count SM	Total Count EFZ	Total Difference	MAE Counts	Max Error Counts	MAE %	Max Error %	Mean Diff Counts	Mean Diff %	Sum Error Counts
212419	8891	7057	-1834	16.56	58	22.54	79.73	-16.34	-21.41	1856
212420	6800	5268	-1532	15.32	49	36.45	216.67	-15.32	-36.45	1532
212433	8195	6825	-1370	13.80	43	17.87	45.68	-13.70	-17.20	1380
212436	8444	6737	-1707	17.07	55	28.44	188.89	-17.07	-26.44	1707
212454	6456	5643	-813	8.27	35	14.87	60.78	-8.13	-13.88	827

Nighttime (20:00-6:00)

clientId	Total Count SM	Total Count EFZ	Total Difference	MAE Counts	Max Error Counts	MAE %	Max Error %	Mean Diff Counts	Mean Diff %	Sum Error Counts
212419	1150	1009	-141	3.70	14	14.03	37.04	-3.20	-11.47	163
212420	1342	780	-562	6.41	23	43.05	216.67	-6.41	-43.06	262
212433	1087	973	-114	2.82	23	11.96	36.36	-3.99	-10.46	124
212436	1187	952	-235	5.34	24	27.21	188.89	-5.34	-27.21	235
212454	936	842	-94	2.36	19	11.64	33.33	-2.14	-9.91	104

Daytime (9:00-14:00)

clientId	Total Count SM	Total Count EFZ	Total Difference	MAE Counts	Max Error Counts	MAE %	Max Error %	Mean Diff Counts	Mean Diff %	Sum Error Counts
212419	3005	2920	-85	24.25	38	19.38	29.63	-24.25	-19.38	485
212420	2260	1849	-409	20.45	38	22.31	35.19	-20.45	-22.31	409
212433	2809	2428	-381	16.05	32	15.78	24.43	-16.05	-15.78	381
212436	2895	2482	-413	22.65	40	19.03	33.61	-22.65	-19.03	413
212454	2146	1986	-160	8.20	20	8.71	19.61	-8.00	-8.57	164

Morning (6:00-9:00)

clientId	Total Count SM	Total Count EFZ	Total Difference	MAE Counts	Max Error Counts	MAE %	Max Error %	Mean Diff Counts	Mean Diff %	Sum Error Counts
212419	1001	1375	426	35.50	57	32.07	59.96	-35.50	-32.07	426
212420	1503	1249	-254	21.17	35	21.19	37.88	-21.17	-21.19	254
212433	1647	1342	-305	25.42	38	23.48	36.89	-25.42	-23.48	305
212436	1724	1325	-399	33.25	55	30.70	55.00	-33.25	-30.70	399
212454	1460	1252	-208	17.33	34	17.66	39.53	-17.33	-17.66	208

Afternoon (14:00-20:00)

clientId	Total Count SM	Total Count EFZ	Total Difference	MAE Counts	Max Error Counts	MAE %	Max Error %	Mean Diff Counts	Mean Diff %	Sum Error Counts
212419	2935	2153	-782	32.58	58	35.99	70.73	-32.58	-35.99	782
212420	1997	1410	-587	24.46	49	42.29	75.38	-24.46	-42.29	587
212433	2652	2082	-570	23.75	43	27.61	45.68	-23.75	-27.61	570
212436	2678	2058	-620	25.83	47	29.07	54.79	-25.83	-29.07	620
212454	1914	1563	-351	14.62	35	23.71	60.78	-14.62	-23.71	351

Timeframe: 30.11.2021 00:00 – 01.12.2021 01:00

Abbildung 75: Vergleich Smartmicro Radardaten vs. EFZ Einzelfahrzeugdaten – LKW-Verkehr 30.11.2021 – 15min Intervall

5.5. Fundamentaldiagramme Per Vehicle Data – 30.11.2021

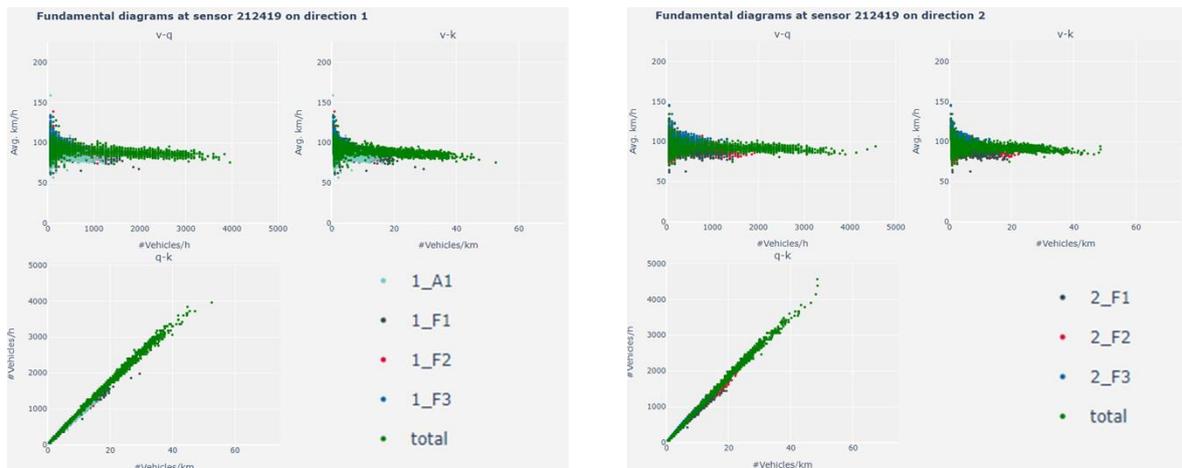


Abbildung 76: Fundamentaldiagramm-Darstellung Sensor 212419 – 30.11.2021 - 1min Intervall

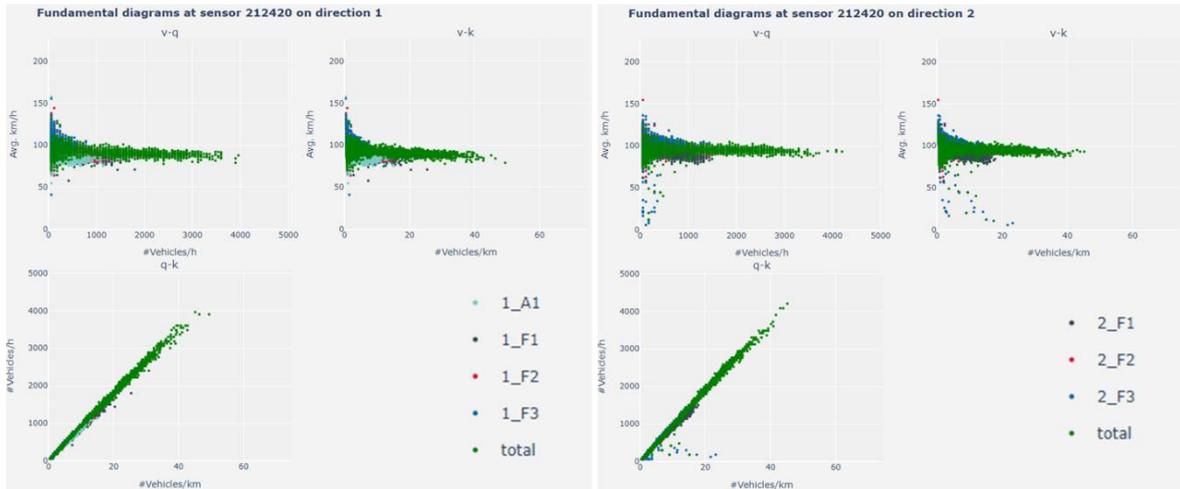


Abbildung 77: Fundamentaldiagramm-Darstellung Sensor 212420 – 30.11.2021 - 1min Intervall

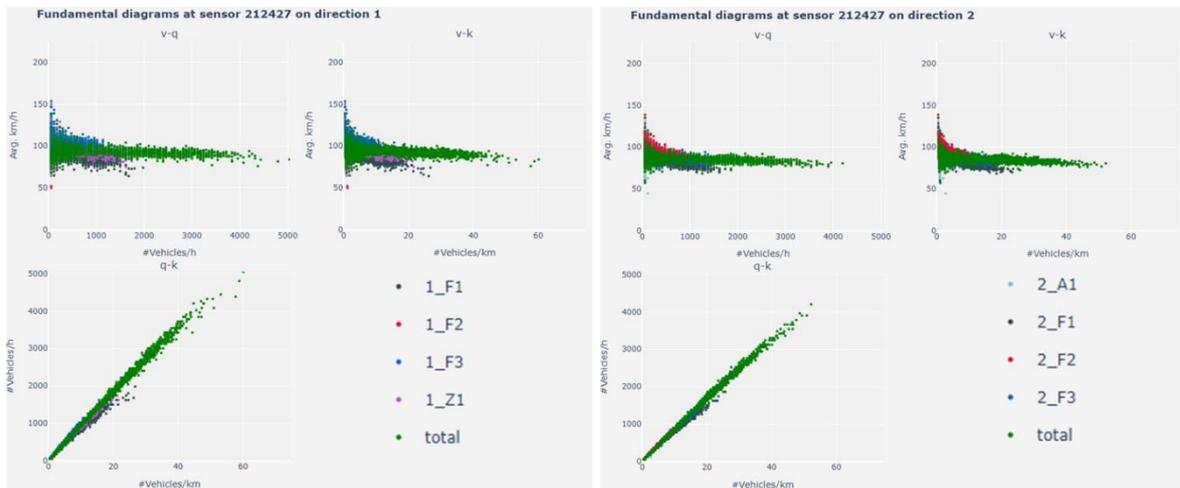


Abbildung 78: Fundamentaldiagramm-Darstellung Sensor 212427 – 30.11.2021 - 1min Intervall

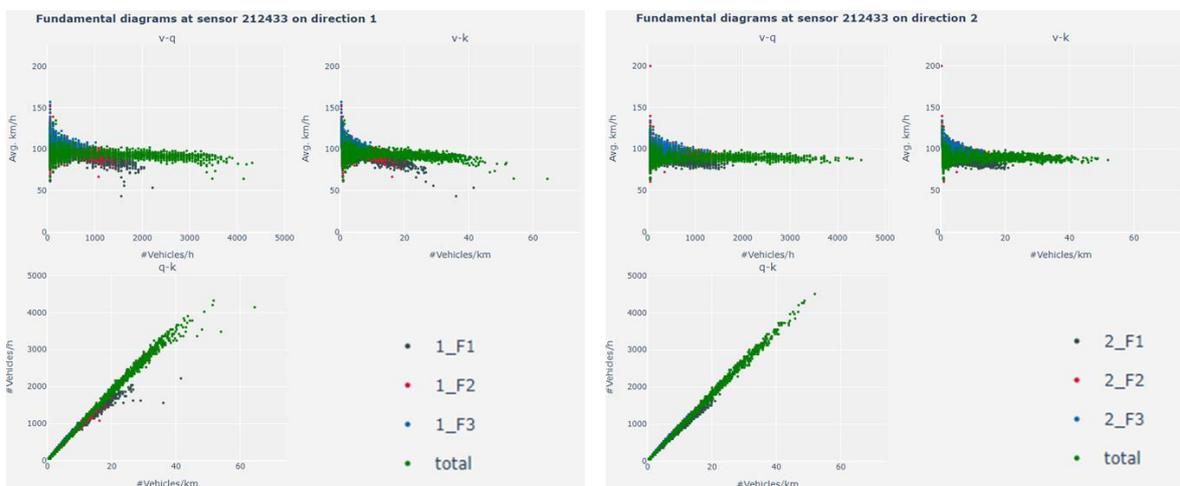


Abbildung 79: Fundamentaldiagramm-Darstellung Sensor 212433 – 30.11.2021 - 1min Intervall

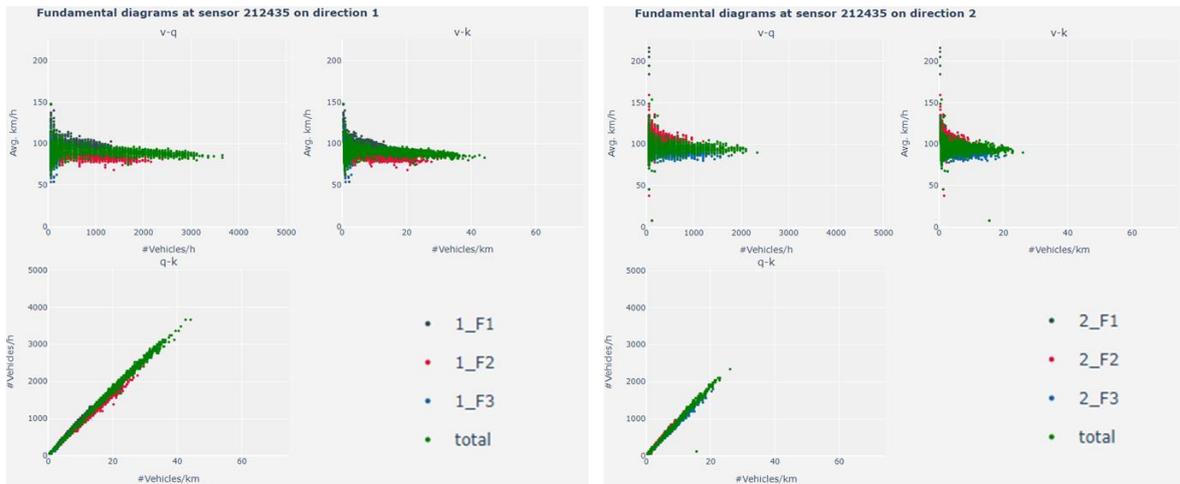


Abbildung 80: Fundamentaldiagramm-Darstellung Sensor 212435 – 30.11.2021 - 1min Intervall

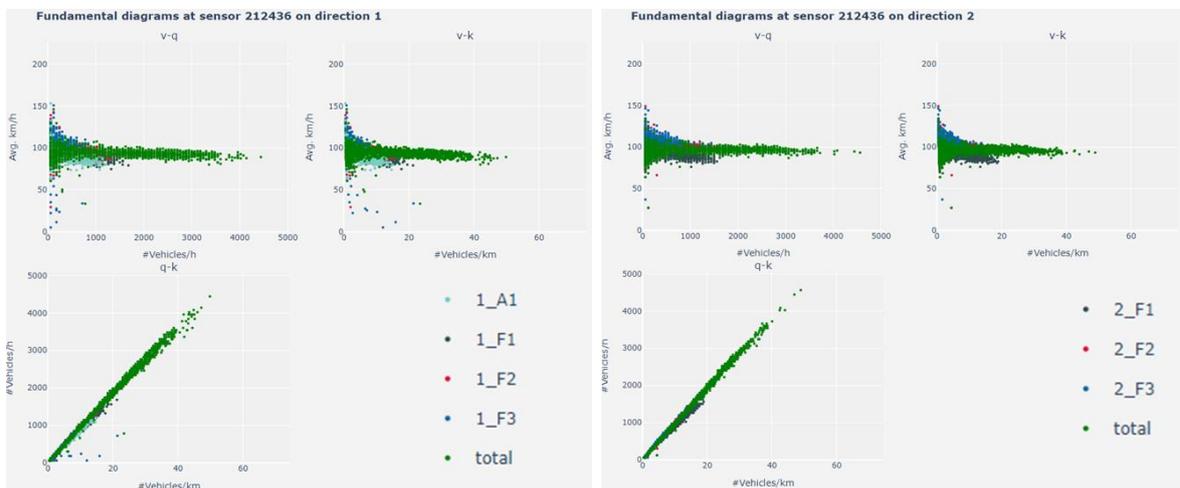


Abbildung 81: Fundamentaldiagramm-Darstellung Sensor 212436 – 30.11.2021 - 1min Intervall

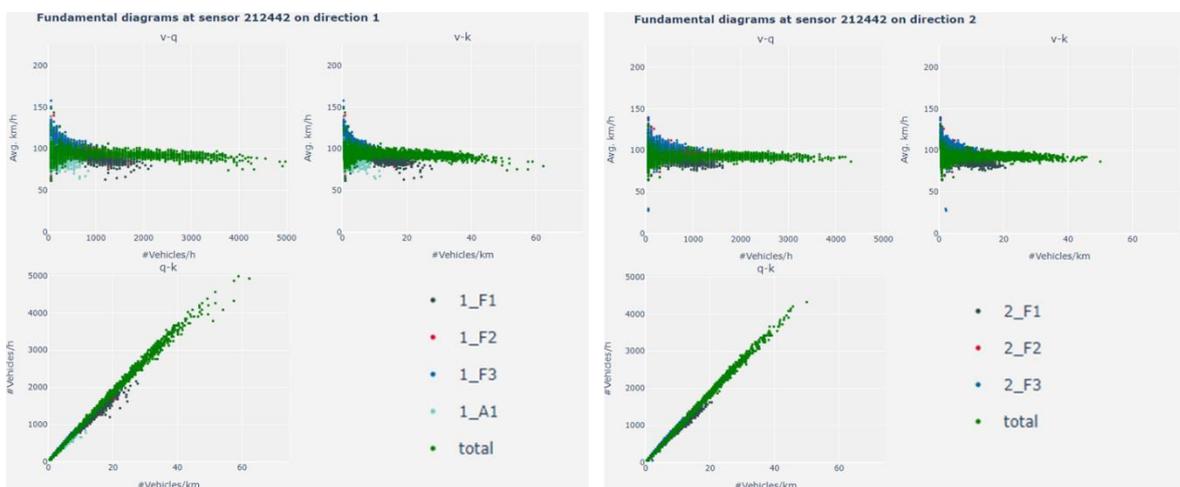


Abbildung 82: Fundamentaldiagramm-Darstellung Sensor 212442 – 30.11.2021 - 1min Intervall

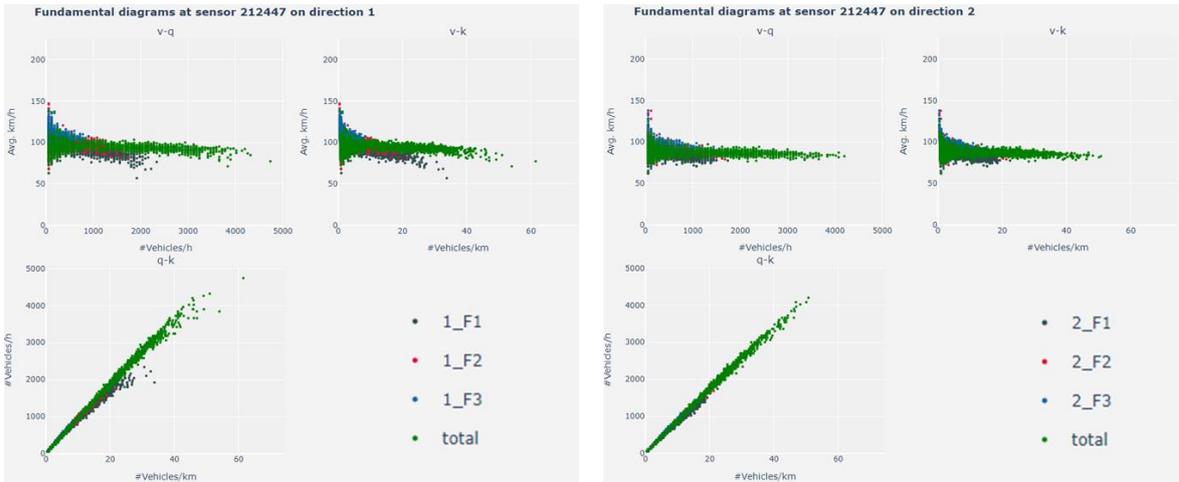


Abbildung 83: Fundamentaldiagramm-Darstellung Sensor 212447 – 30.11.2021 - 1min Intervall

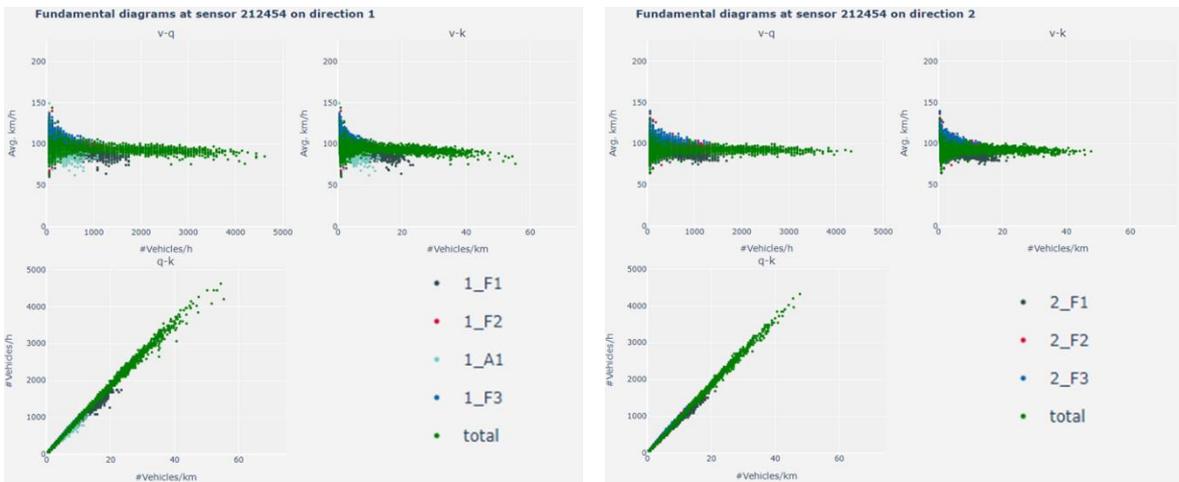


Abbildung 84: Fundamentaldiagramm-Darstellung Sensor 212454 – 30.11.2021 - 1min Intervall

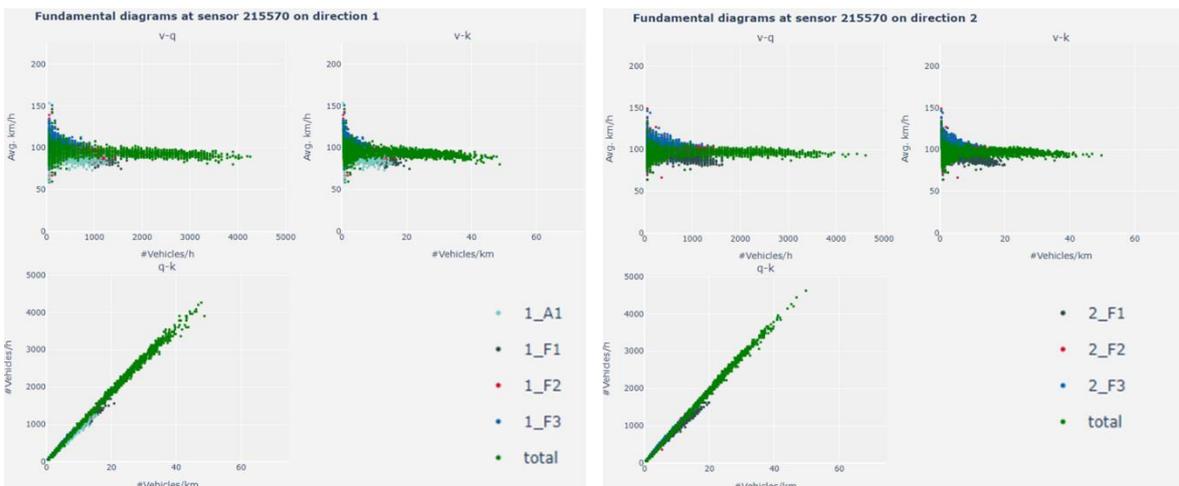


Abbildung 85: Fundamentaldiagramm-Darstellung Sensor 215570 – 30.11.2021 - 1min Intervall