

# Endbericht iRoute2

## Empfehlungen für die Ausstattung von lokaler, mobiler und strecken- bezogener Detektion für Störungs- und Verkehrslageerkennung

### **Auftraggeber**

Landesbaudirektion Bayern  
Zentralstelle Verkehrsmanagement (ZVM)  
Schwere-Reiter-Str. 41  
80797 München

### **Auftragnehmer**

Technische Universität München (TUM)  
Lehrstuhl für Verkehrstechnik (TUM-VT)  
Arcisstr. 21  
80333 München

### **Autoren**

Dipl.-Math. Lisa Kessler  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Bogenberger

München, im Februar 2021



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b><u>KONTEXT, AUFGABENSTELLUNG, ZIELSETZUNG UND VORGEHEN</u></b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b><u>BESCHREIBUNG DER DATENVERARBEITUNG</u></b>	<b>6</b>
2.1	RAUM-ZEITLICHE GESCHWINDIGKEITSDARSTELLUNG	6
2.2	SIMULATION EINES FAHRZEUGS DURCH VIRTUELLE TRAJEKTORIEN	6
2.3	BEISPIEL	7
2.4	DEFINITION VON STAUTYPEN	8
2.5	AUTOMATISIERTE ZUWEISUNG EINES STAUTYPS ZU EINEM STÖRFALL	9
<b>3</b>	<b><u>VERFÜGBARE DATEN UND DATENAUFBEREITUNG</u></b>	<b>10</b>
3.1	BUNDESAUTOBAHN 9	10
3.2	ÜBERKOPF-SENSORIK	13
3.2.1	DATENFORMAT UND VERFÜGBARE WERTE	13
3.2.2	AUFBEREITUNG	13
3.2.3	BEISPIEL	14
3.3	SEITENRADAR	15
3.3.1	DATENFORMAT UND VERFÜGBARE WERTE	15
3.3.2	AUFBEREITUNG	15
3.3.3	BEISPIEL	15
3.4	FLOATING-CAR-DATEN	16
3.4.1	DATENFORMAT UND VERFÜGBARE WERTE	16
3.4.2	AUFBEREITUNG	16
3.4.3	BEISPIEL	16
3.5	BLUETOOTH	17
3.5.1	DATENFORMAT UND VERFÜGBARE WERTE	17
3.5.2	AUFBEREITUNG	17
3.5.3	BEISPIEL	18
<b>4</b>	<b><u>DATENFUSION UND „GOLD-STANDARD“</u></b>	<b>19</b>
4.1	FUSIONSANSÄTZE	19
4.2	GOLD-STANDARD	23
<b>5</b>	<b><u>VERGLEICHE UND BEWERTUNG</u></b>	<b>24</b>
5.1	STAUTYPENERKENNUNG	24
5.1.1	ÜBERKOPFSENSORIK-DATEN	25
5.1.2	SEITENRADAR-DATEN	25
5.1.3	FLOATING-CAR-DATEN	26
5.1.4	BLUETOOTH-DATEN	27
5.1.5	FUSIONIERTER GESCHWINDIGKEITSDATEN	28
5.2	STAUSCHWERPUNKTANALYSE	29
5.2.1	DATEN AUS LOKALER VERKEHRSERFASSUNG	29
5.2.2	DATEN AUS MOBILER VERKEHRSERFASSUNG	33
5.2.3	DATEN AUS STRECKENBEZOGENER ERFASSUNG	37

5.2.4	VERGLEICH DER ERFASSUNGSTECHNOLOGIEN.....	42
<b>6</b>	<b><u>AUSSTATTUNGSEMPFEHLUNGEN UND KOSTENVERGLEICH.....</u></b>	<b>44</b>
6.1	AUSSTATTUNGSEMPFEHLUNGEN .....	45
6.2	KOSTENVERGLEICH .....	47
<b>7</b>	<b><u>GEWONNENE ERKENNTNISSE ZUR DATENQUALITÄT .....</u></b>	<b>49</b>
7.1	ANPR-KAMERAS .....	49
7.2	DATENQUALITÄTSSICHERUNG .....	49
7.2.1	ÜBERKOPF-SENSORIK.....	49
7.2.2	BLUETOOTH-SENSORIK.....	50
7.2.3	SEITENRADAR-SENSORIK .....	50
7.2.4	FLOATING-CAR-DATEN .....	50
7.2.5	FUSION DER DATENQUELLEN .....	50
7.2.6	VORSCHLÄGE FÜR ZUKÜNFTIGE MAßNAHMEN UND VORGEHENSWEISEN.....	50
<b>8</b>	<b><u>ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT .....</u></b>	<b>51</b>
<b>9</b>	<b><u>LITERATURVERZEICHNIS.....</u></b>	<b>53</b>

# 1 Kontext, Aufgabenstellung, Zielsetzung und Vorgehen

Zur Erfassung von Verkehrslage und Störfällen (Stau etc.) gibt es verschiedene Möglichkeiten, die aber aus wirtschaftlichen Überlegungen nicht flächendeckend zum Einsatz kommen können. Autobahnabschnitte mit Streckenbeeinflussungsanlagen sind im Vergleich zu peripheren Abschnitten ohne Anlagen im Allgemeinen gut mit Erfassungsmöglichkeiten ausgestattet. Dementsprechend qualitativ unterschiedlich sind die Erfassung und Darstellung von Verkehrslage und Störfällen im Straßennetz. In diesem Projekt iRoute2 soll untersucht werden, welche Möglichkeiten es gibt, die Erfassung von Verkehrslage und Störfällen flächendeckend zu verbessern.

Die Autobahn A9 ist als digitales Testfeld mit verschiedenen Erfassungsmöglichkeiten für Verkehrsdaten ausgestattet. Zum einen gibt es seit langem lokale Detektoren (Überkopfsensorik), die die Anzahl an passierenden Fahrzeugen ( $q$ ) wie auch deren lokale Geschwindigkeit ( $v$ ) erfassen. Weiterhin gibt es neu auf dieser Strecke, überwiegend im Verdichtungsraum Ingolstadt, Seitenradar als lokale Verkehrsdatenerfassungsmöglichkeit. Zusätzlich kann die Verkehrslage durch mobile Detektoren erfasst werden. Dazu zählen heutzutage im Wesentlichen Floating-Car-Daten (FCD). Hierbei werden Daten, z.B. Positionsdaten, durch ein Navigationsgerät in einem sich bewegenden Fahrzeug erfasst. Eine dritte Datenerfassungstechnologie auf der A9 sind Reisezeitmessungen. Bluetooth-Scanner registrieren ein vorbeifahrendes Bluetooth-Gerät an zwei Scannern und berechnen anhand der beiden Zeitstempel die Reisezeit zwischen diesen Orten. So lassen sich räumliche – streckenbezogene – Reisegeschwindigkeiten ermitteln. Überkopfsensorik war bereits vor dieser Studie auf den betrachteten Streckenabschnitten im Einsatz; Seitenradar und Bluetooth wurden neu für den dauerhaften Betrieb über diese Studie hinaus installiert. Des Weiteren wurden Floating-Car-Daten bei den Auswertungen mit betrachtet.

Diese drei Erfassungstechnologien – lokale, mobile und streckenbezogene Erfassung – wurden im Projekt gegenübergestellt und bewertet. Ziel der Untersuchung war es, unter Beachtung der Wirtschaftlichkeit Empfehlungen für den optimalen Einsatz und notwendigen Umfang der drei Erfassungstechnologien zu ermitteln, so dass eine flächendeckende, bayernweite Verkehrslageerfassung und Störfallerkennung gewährleistet werden kann. Aus den Ergebnissen waren ableitbare, allgemein gültige Empfehlungen für eine wirtschaftliche Ausstattung der Detektion zur Verkehrslageerfassung und Störfallerkennung auf Autobahnen zu entwickeln.

Die Methodik der Untersuchungen enthält Typisierungen für Ausstattungsvarianten wie Strecken mit/ohne Ausstattung durch Verkehrsdetektion in Verdichtungsräumen sowie Strecken außerhalb von Verdichtungsräumen (ohne Verkehrsdetektion). Die Bewertung erfolgt in hochstörungsauffälligen, teilweise störungsauffälligen und nicht störungsauffälligen Bereichen, definiert über die Anzahl an störungsauffälligen Ereignissen. Dies umfasst, welche Kombinationen der Detektionstechnologien (lokale Erfassung wie z.B. Daten aus Überkopfsensorik oder Seitenradar; mobile Erfassung wie z.B. FCD; streckenbezogene Erfassung wie z.B. Bluetooth-Erfassung) und welcher Umfang für die Detektion sowie die Störfallerkennung und die Verkehrslageermittlung aus wirtschaftlichen Gründen vorzusehen sind. Ein Störfall ist dabei als ein Geschwindigkeitseinbruch unterhalb einer parametrierbaren Geschwindigkeit  $v_{crit}$  definiert.

Zunächst werden alle drei – lokale, mobile und streckenbezogene – Datenquellen einzeln durch entsprechende verkehrstechnische Modelle aufbereitet. Somit erhält man je Datenerfassung eine zeitlich-räumliche Darstellung der Verkehrslage, d.h. eine raum-zeitlich kontinuierliche Darstellung der Geschwindigkeiten (sog. „speed contour plot“). Diese Verkehrslage wird im Anschluss an die Datenverarbeitung nach einem Datenplausibilisierungsverfahren aus allen drei Quellen fusioniert zu einem sog. „Gold-Standard“. Dieses aus allen drei Datenquellen fusionierte Geschwindigkeitsfeld entspricht nun der bestmöglichen verfügbaren Verkehrsdatenlage für die jeweilige Verkehrssituation. Im Projekt wird dieses als Referenz betrachtet. Im Anschluss erfolgen Vergleiche der einzelnen Erfassungsmöglichkeiten, sowohl bezüglich der Referenz als auch untereinander, und die Bewertung zur Ausstattungsempfehlung unter Berücksichtigung der Kosten.

## 2 Beschreibung der Datenverarbeitung

Das Verkehrsgeschehen wird als zeitlich-räumlich diskretisierte Darstellung der Geschwindigkeit aufgefasst. Dazu werden die verfügbare Strecke und der betrachtete Zeitraum jeweils in Intervalle unterteilt und es entstehen Zellen eines Gitters. Die in dieser Studie verwendete Gittergröße ist 1 min und 500 m. Kapitel 3 stellt die Daten genauer vor.

### 2.1 Raum-zeitliche Geschwindigkeitsdarstellung

Sei  $X$  die zu betrachtende Strecke, diskretisiert in Intervalle  $x_i$ . Analog sei  $T$  der zu betrachtende Zeitraum mit diskretisierten Intervallen  $t_j$ . Dann wird durch die Zellen  $x_i \times t_j$  ein Gitter aufgespannt. Jeder Zelle wird ein konstanter Geschwindigkeitswert aus den gemessenen Detektionswerten zugewiesen, siehe Abbildung 1.

Im Fall lokaler Detektion werden als Ortszellen die Standorte der Messeinrichtungen verwendet, bei der mobilen Detektion der nächstmögliche Bezugspunkt der GPS-Erfassung. Für Reisezeiten wurde ein eigener Algorithmus implementiert, da die aktuelle Literatur bisher nichts Anwendbares liefert, vgl. Kapitel 3.5.2.

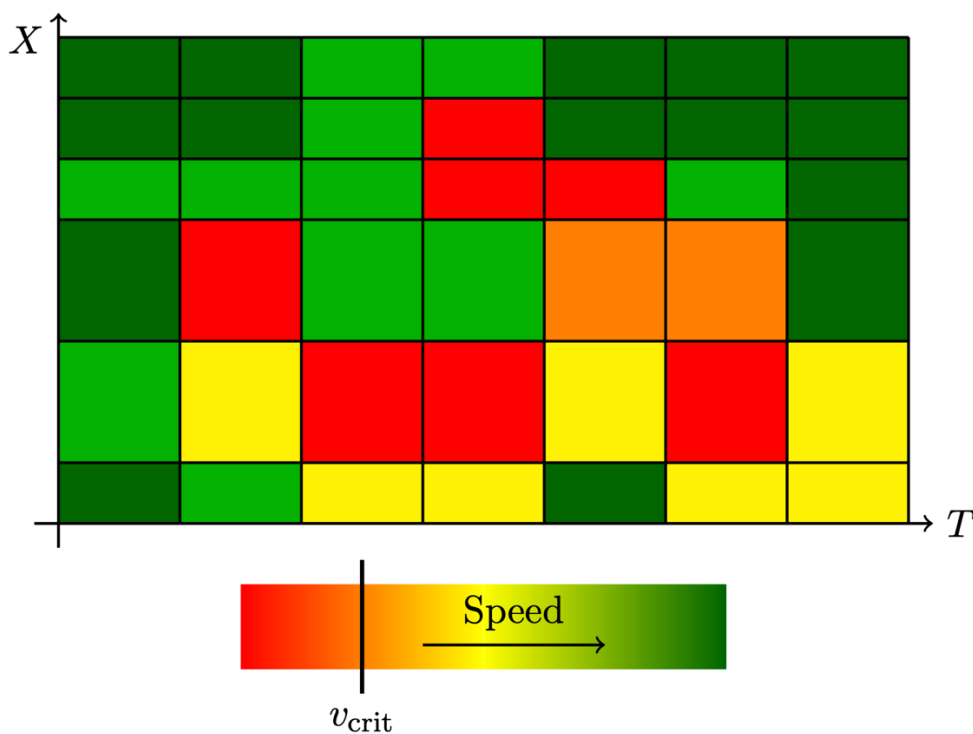


Abbildung 1 Raum-zeitlich diskretisierte Darstellung der Geschwindigkeit

Wenn für eine Zelle keine Geschwindigkeitsdaten vorliegen, beispielsweise weil ein Detektor keine Daten liefert oder kein Detektor in diesem Abschnitt installiert ist, werden die Geschwindigkeiten je nach Anwendungsfall entweder auf null (weiß in der Darstellung) oder auf die vorherrschende Freiflussgeschwindigkeit, z. B. 120 km/h, (dunkelgrün in der Darstellung) gesetzt.

### 2.2 Simulation eines Fahrzeugs durch virtuelle Trajektorien

In diesem Gitter können nun durchfahrende Fahrzeuge simuliert werden. Beginnend an einem Zeitpunkt und einem Ort durchläuft das Fahrzeug verschiedene Zellen des Geschwindigkeitsfelds und bewegt sich jeweils mit der aktuell vorherrschenden Geschwindigkeit der befahrenen Zelle fort. Die Spur, die es dabei zurücklegt, wird „Trajektorie“, genauer „virtuelle Trajektorie“, genannt.

Abbildung 2 zeigt die Simulation eines virtuell fahrenden Fahrzeugs, beginnend bei einem Startpunkt  $(x_s, t_s)$ . Je größer die Geschwindigkeit ist, desto steiler ist die Steigung in der jeweiligen Zelle (z.B.

in „grünen“ Zellen ist die Steigung größer als in „roten“ Zellen). Ein Fahrzeug fährt immer von der unteren linken Ecke in Richtung der oberen rechten Ecke.

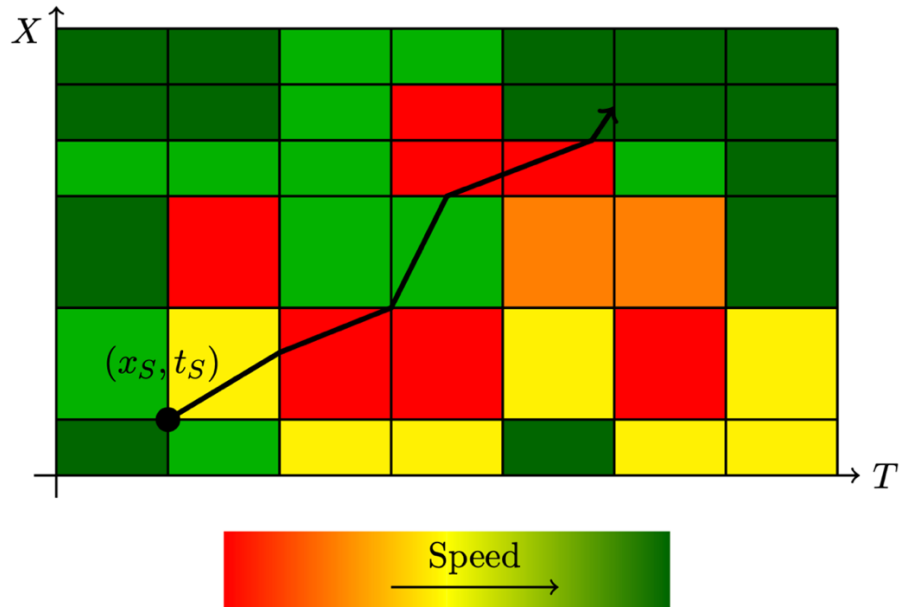


Abbildung 2 Simulation eines virtuellen Fahrzeugs

### 2.3 Beispiel

Abbildung 3 zeigt ein Beispiel einer raum-zeitlichen Darstellung, hier aus Überkopfsensorik-Rohdaten. Die x-Achse stellt die Zeit dar, hier von einem Tag. Die y-Achse stellt den Ort dar, wobei Fahrzeuge von unten links nach oben rechts fahren. Die Farbskala zeigt die Geschwindigkeit. Dargestellt sind Daten eines Tages (0 bis 24 Uhr), entlang der Strecke von München nach Nürnberg (km 530 bis km 370). Die Überkopfsensorik ist dabei in zwei verschiedenen Bereichen installiert, im Münchner Bereich (Süden) und im Nürnberger Bereich (Norden). Dazwischen ist keine lokale Datenerfassung durch Überkopfsensorik verfügbar, daher wurde dieser Bereich auch in „weiß“ – d.h. ohne Daten – dargestellt.



Abbildung 3 Beispiel einer raum-zeitlichen Darstellung aus Überkopf-Rohdaten

## 2.4 Definition von Stautypen

Abhängig davon, welche Geschwindigkeiten eine Trajektorie durchläuft, können verschiedene Verkehrsmuster definiert werden. Im Projekt sind insbesondere solche Verkehrsmuster relevant, die einen Störfall aufweisen, die also eine Staugeschwindigkeit  $v_{crit}$  unterschreiten.

Im bayerischen Autobahnnetz wurden neben dem ungestauten Verkehr vier verschiedene Stautypen identifiziert, siehe Tabelle 1. Analog gelten diese Stautypen auch für alle anderen Bundesländer. Anhand mehrerer Parameter können diese voneinander abgegrenzt werden. Für eine ausführliche Darstellung der Stautypen siehe [1].

Stautyp	Beschreibung	Beispiel
Stauwelle	Kurzer Geschwindigkeitseinbruch	Überholvorgang eines Fahrzeugs
Stop & Go	Dicht aufeinanderfolgende, wiederkehrende kurze Geschwindigkeitseinbrüche	Inhomogener Verkehr (Wechsel zwischen schnelleren und langsameren Abschnitten in kurzer Zeit)
Breiter Stau	Stationäre Behinderung mit ausgeprägtem Stau stromaufwärts	Unfall, Fahrstreifenreduktion
Mega-Stau	Großflächiger breiter Stau mit langanhaltender Unterschreitung der Staugeschwindigkeit	Unfall, Arbeitsstelle, Fahrstreifen-sperrungen, starke Überlastung durch Reiseverkehr

Tabelle 1 Definition von Stautypen

Abbildung 4 zeigt schematisch die Differenzierung der verschiedenen Stautypen. Sei  $t_0$  das erste Unterschreiten der Grenzggeschwindigkeit (z. B. 40 km/h) einer Trajektorie und  $t_1$  der Zeitpunkt, zu dem die Trajektorie die Staugeschwindigkeit wieder für mindestens eine Zeit  $t_{break}$  (z. B. 4 min) überschreitet. Dann wird mittels des dargestellten Ablaufdiagramms entschieden, um welchen Stautyp es sich handelt. Kurz gesagt wird geprüft, ob eine Trajektorie den Geschwindigkeitswert nur kurzzeitig (z. B. maximal 3 min) unterschreitet. Dann handelt es sich um eine Stauwelle (engl. JAM WAVE). Dauert die Unterschreitung sehr lange an (z. B. mehr als 30 min), ist es ein Mega-Stau (engl. MEGA JAM). Ansonsten wird die Anzahl der Geschwindigkeitseinbrüche untersucht. Ist es im Wesentlichen eine länger andauernde Phase einer Geschwindigkeit unterhalb von  $v_{crit}$ , ist es ein Breiter Stau (engl. WIDE JAM). Schwankt die Geschwindigkeit häufig (z. B. mindestens drei Mal) um den Wert von  $v_{crit}$ , handelt es sich um einen Stop&Go-Verkehr. Die mathematische Herleitung der Parameter sowie eine Sensitivitätsanalyse kann im Artikel [2] nachgelesen werden.



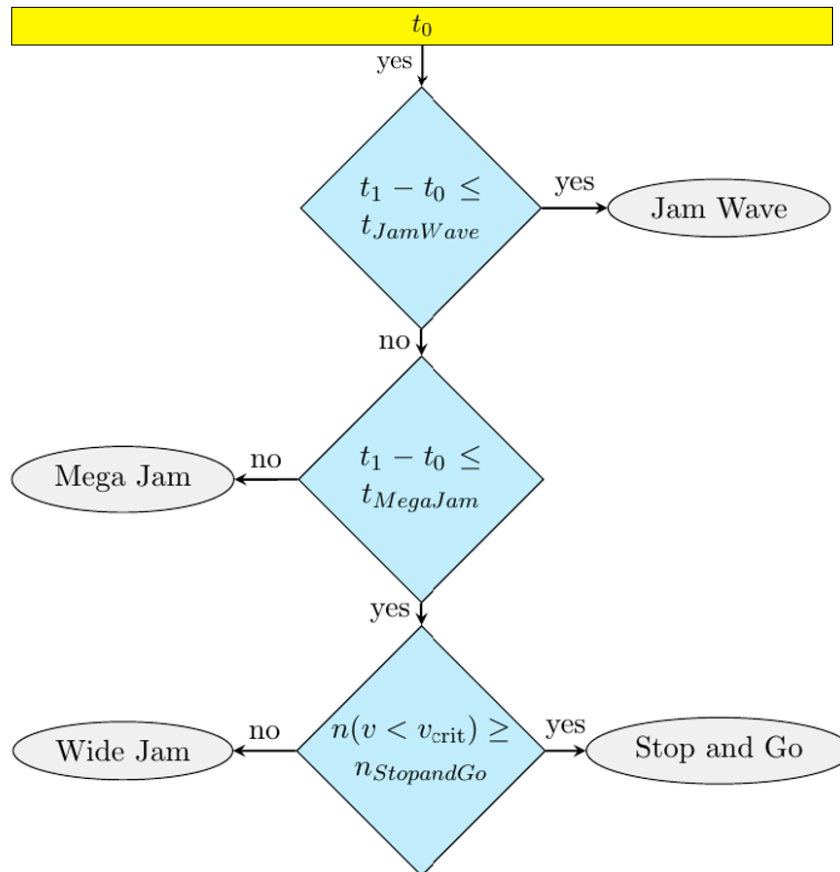


Abbildung 4 Differenzierung der Stautypen

Tabelle 2 zeigt eine mögliche, für die Analysen empfohlene Parametrierung.

Parameter	Wert
Staugrenzgeschwindigkeit $v_{crit}$	40 km/h
Abgrenzung verschiedener Stauungen $t_{break}$	4 min
Maximale Dauer einer Stauwelle $t_{JamWave}$	3 min
Minimale Dauer eines Mega-Staus $t_{MegaJam}$	30 min
Minimale Anzahl an Geschwindigkeitseinbrüchen $n_{StopandGo}$	3

Tabelle 2 Empfohlene Parametrierung

## 2.5 Automatisierte Zuweisung eines Stautyps zu einem Störfall

Hat eine Trajektorie einen Störfall erkannt, wird also die Grenzgeschwindigkeit  $v_{crit}$  beim Durchlauf des gesamten Geschwindigkeitsfelds mindestens in einem Zeitschritt  $t_j$  unterschritten, wird mit obigem Algorithmus geprüft, welchem Stautyp eine einzelne Trajektorie zuzuordnen ist. Werden nun Trajektorien mit einem geringen zeitlichen Abstand (z. B. 5 min) vom Startpunkt der Messungen losgeschickt, so dass mehrere virtuelle Fahrzeuge das gleiche Cluster, definiert als konvexe Hülle der identifizierten Stauung, durchfahren, kann mittels der Algorithmen beschrieben in [3], [4] und [5] für das gesamte Staucluster ein Stautyp ermittelt werden. Im Wesentlichen ist die Zuordnung eines Stautyps zu einem Cluster eine häufigkeitsbasierte Zuordnung basierend auf den Stautypen jeder durchfahrenden Trajektorie.

### 3 Verfügbare Daten und Datenaufbereitung

In diesem Projekt wurde die Autobahn A9 zwischen München und Nürnberg in beiden Fahrrichtungen untersucht. Sie ist standardmäßig mit Überkopf-Sensorik, Seitenradar und Bluetooth-Scannern ausgestattet. Weiterhin wurden im Projekt Floating-Car-Daten (FCD) als Vergleich hinzugezogen. Alle Daten, die hier betrachtet werden, sind in Echtzeit vorhanden und basieren nicht auf historischen Daten.

#### 3.1 Bundesautobahn 9

Abbildung 5 zeigt eine schematische fahrstreifenfeine Darstellung der betrachteten Strecke.

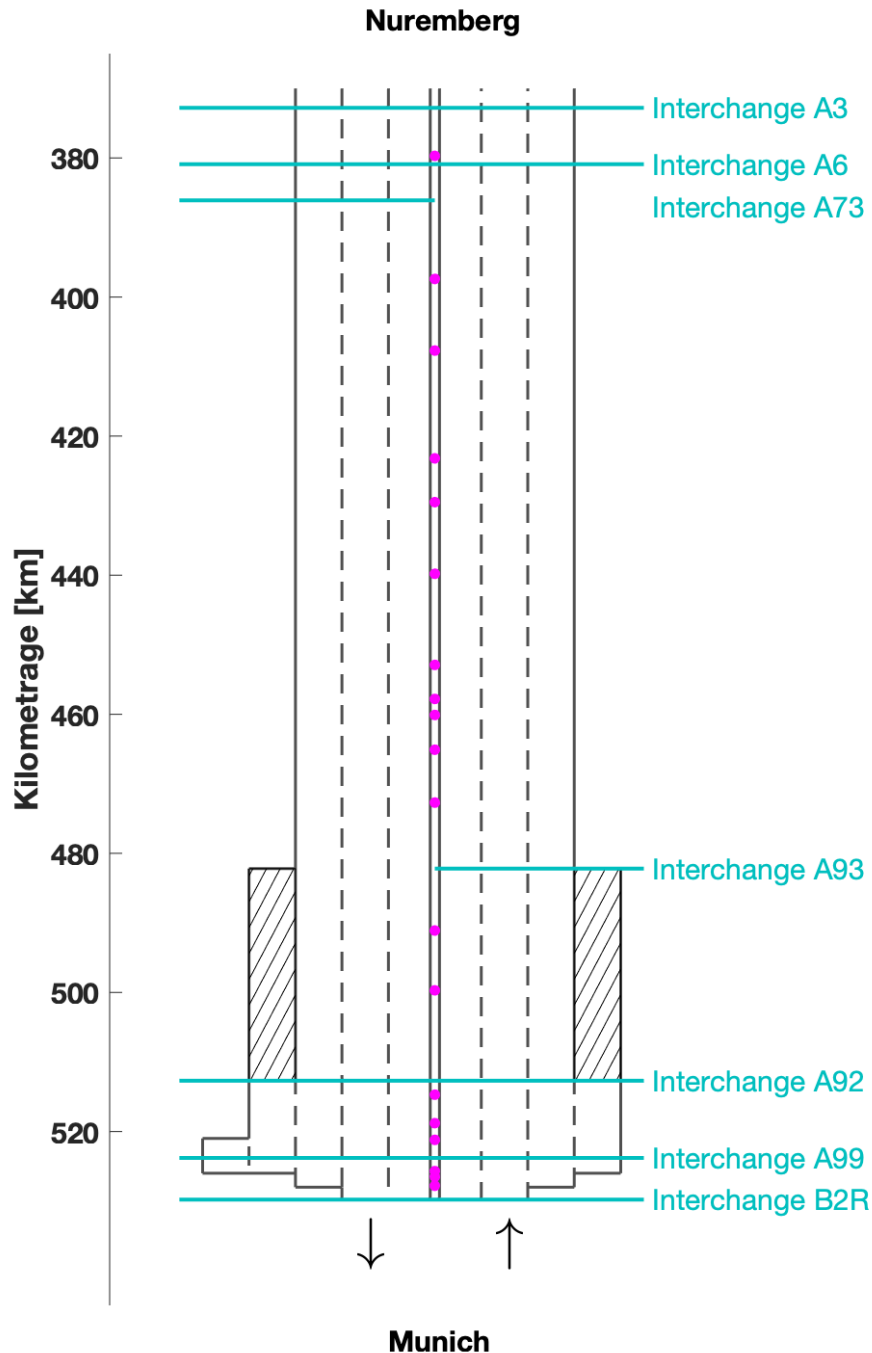


Abbildung 5 Schematische Darstellung der Autobahn mit Kilometrierung, Fahrstreifenverteilung, Autobahnkreuzen (türkis), Anschlussstellen (violett) und temporärer Seitenstreifenfreigabe (schraffiert)

Abbildung 6 zeigt die schematische Darstellung der A9 mit der verwendeten Sensorik: Überkopf-, Seitenradar- und Bluetooth-Erfassung. FCD sind entlang der gesamten Strecke verfügbar.

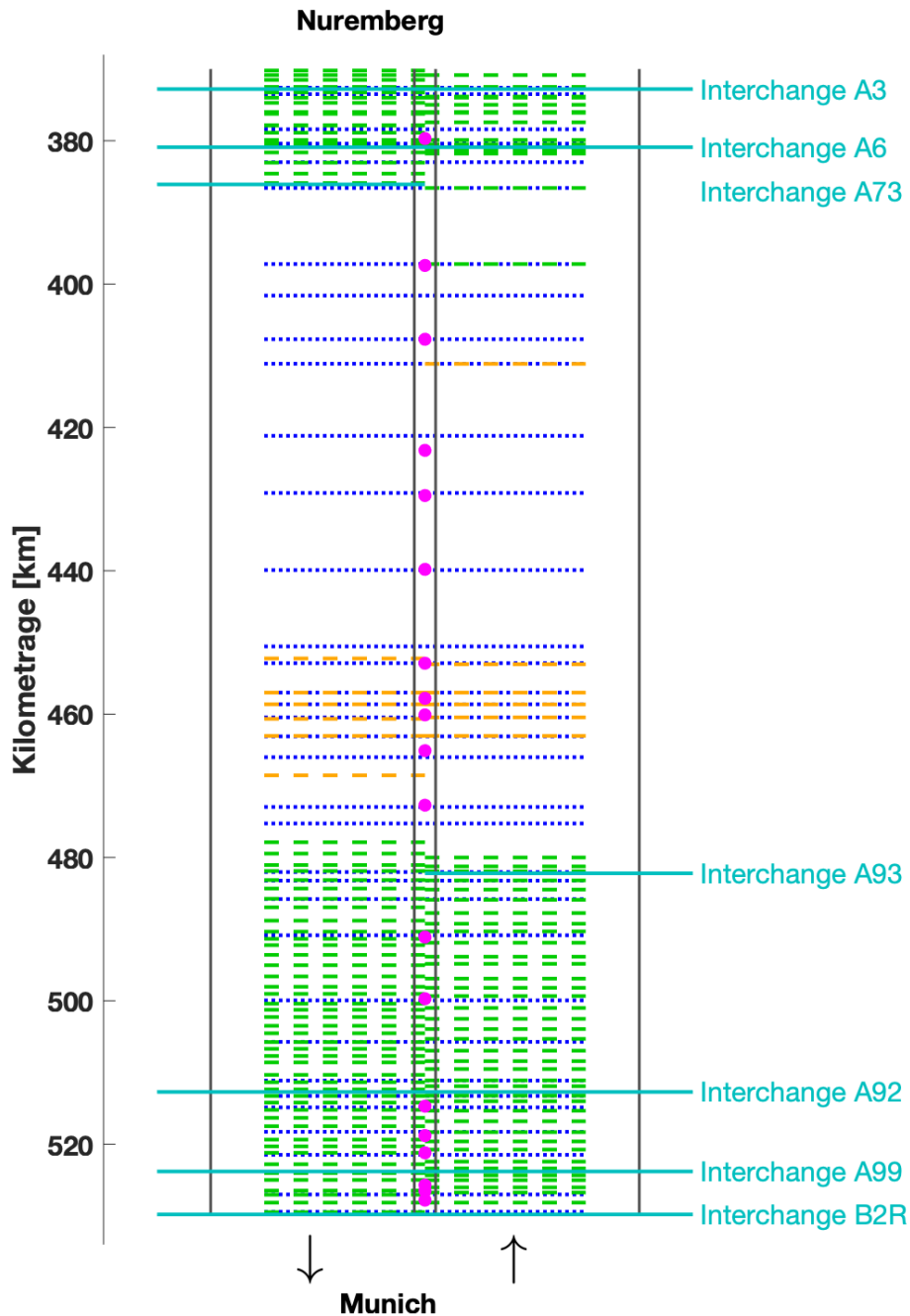


Abbildung 6 Untersuchte Strecke mit vorhandener Sensorik: Überkopf-Detektoren (grün), Seitenradar (orange), Bluetooth-Scanner (blau)

Häufig werden Verkehrsflüsse dargestellt, wie es Abbildung 7, die mittleren Reisezeitverluste 2017, zeigt. Das Ziel dieses Projekts ist, anhand der Reisezeitverluste in der Karte die Streckentypen zu definieren, für die detaillierte Angaben zu Stautypen abzuleiten sind, und hieraus die Empfehlungen zur flächendeckenden Ausstattung mit Detektionstechnologien zu geben. Die dargestellte Karte bietet eine Übersicht über BAB-Streckenabschnitte mit unterschiedlichen Reisezeitverlusten.

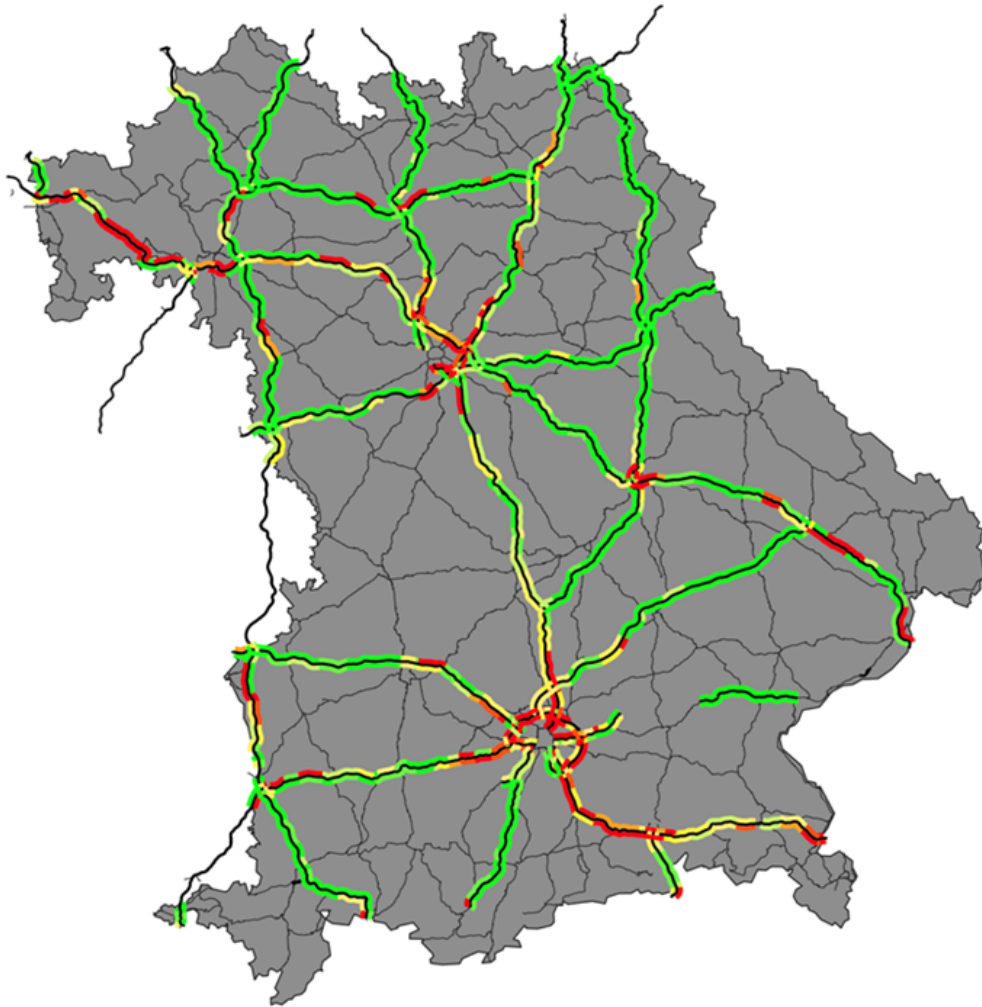


Abbildung 7 Reisezeitverluste auf Streckenabschnitten in gelb und rot, Bayern 2017;  
Quelle: ZVM

Hierbei sind verschiedene Einflüsse und Problemstellungen dargestellt, etwa Berufsverkehr oder Reiseverkehr. Um diese unterschiedlichen Typisierungen zu kategorisieren, werden Stauereignisse in dieser Studie als Stautypen klassifiziert.

Nicht von allen Datenquellen liegen plausible und verwendbare Daten in den gleichen Zeiträumen vor, daher wird die Analyse für jeweils zwei Monate der Datenerhebung durchgeführt. Die Fusion beruht auf einzelnen Tagen im April und Mai 2019, die Stauschwerpunkte werden für jeweils mindestens zwei aufeinanderfolgende Monate berechnet. Folgende Zeiträume wurden im Projekt analysiert:

Überkopf-Sensorik	Februar, April, Mai, Juni, Juli 2019
Seitenradar	Februar, April, Mai, Juni, Juli 2019
Bluetooth	April + Mai 2019
Floating-Car-Daten	Einzelne Tage im April + Mai 2019, November + Dezember 2019

Tabelle 3 Zeiträume der Erfassung

Für Streckenabschnitte mit Reisezeitverlusten sind gegenüber den Streckenabschnitten ohne Reisezeitverluste variierende Ausstattungen mit Detektionstechnologien vorzusehen. Zur weiteren Typisierung werden Wirtschaftsräume gegenüber der „freien Strecke“ abgegrenzt, als „Verdichtungsraum mit Erfassung“, „Verdichtungsraum ohne Erfassung“ und „Außerhalb Verdichtungsraum“.

Die Ausstattungsempfehlungen werden getrennt für Verdichtungsräume und Bereiche außerhalb von Verdichtungsräumen gegeben. Die Einteilung innerhalb Bayerns ist in Abbildung 8 gegeben.

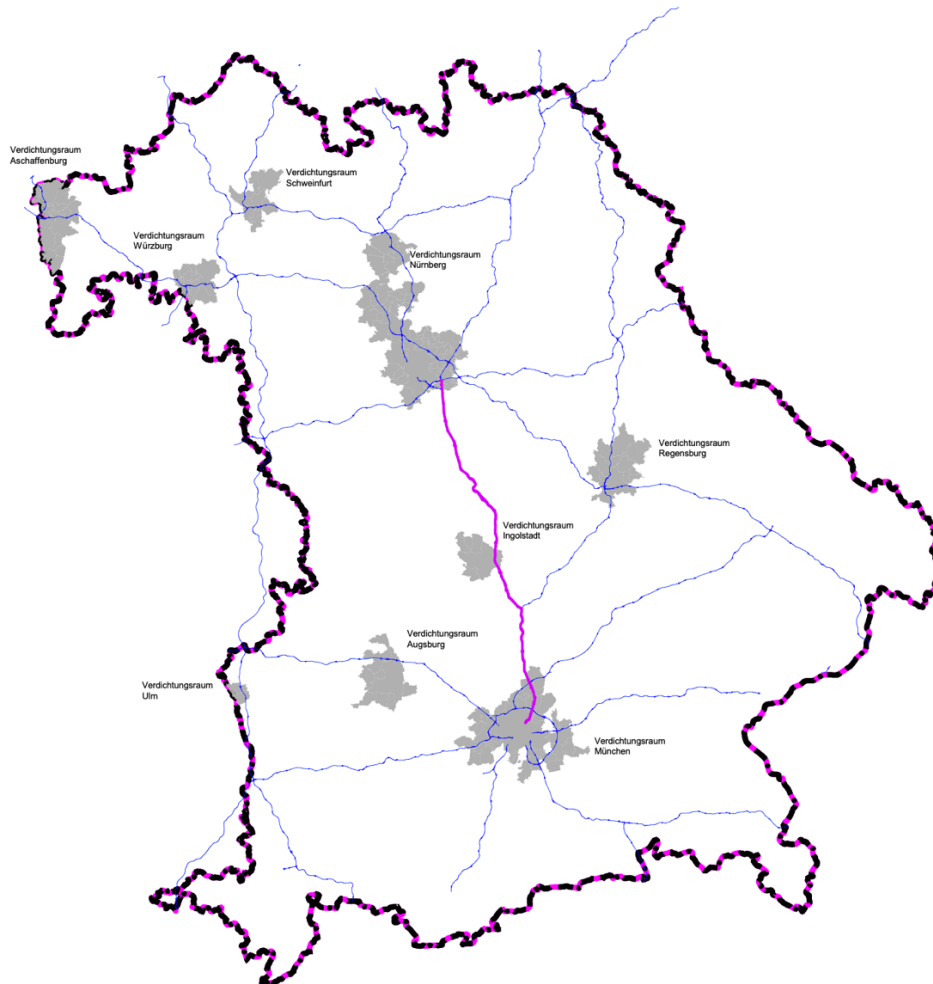


Abbildung 8 Übersicht Bayern mit Verdichtungsräumen (grau), BAB (blau) und Testfeld des Projekts (violett); Quelle: ZVM

### 3.2 Überkopf-Sensorik

Überkopf-Detektoren sind fahstreifenfein in zwei Abschnitten verfügbar. Im südbayerischen Bereich im Streckenabschnitt zwischen km 480 und km 529 mit einem durchschnittlichen Abstand von 1,3 km (FR Nürnberg) bzw. 1,2 km (FR München), im nordbayerischen Bereich im Streckenabschnitt zwischen km 372 und km 400 mit einem durchschnittlichen Abstand von 1,9 km (FR Nürnberg) bzw. 0,8 km (FR München).

#### 3.2.1 Datenformat und verfügbare Werte

Erfasst werden gemittelte Geschwindigkeits- und aggregierte Verkehrsstärkewerte je Minute. Bis auf wenige Ausnahmen (< 2% der Datensätze) liefern alle Messstandorte durchgehend plausible Daten.

#### 3.2.2 Aufbereitung

Die Querschnittsdaten werden mittels der sog. *adaptive smoothing method* (ASM, [6]) interpoliert. Dies ist eine anisotrope Interpolationsmethode, die gemessene Werte um die Bereiche zwischen

Detektoren erweitert. Auf diese Weise entsteht ein vollständiges raum-zeitliches Geschwindigkeitsbild. Folgende Abbildung 9 stellt die Funktionsweise der Methode beispielhaft dar.

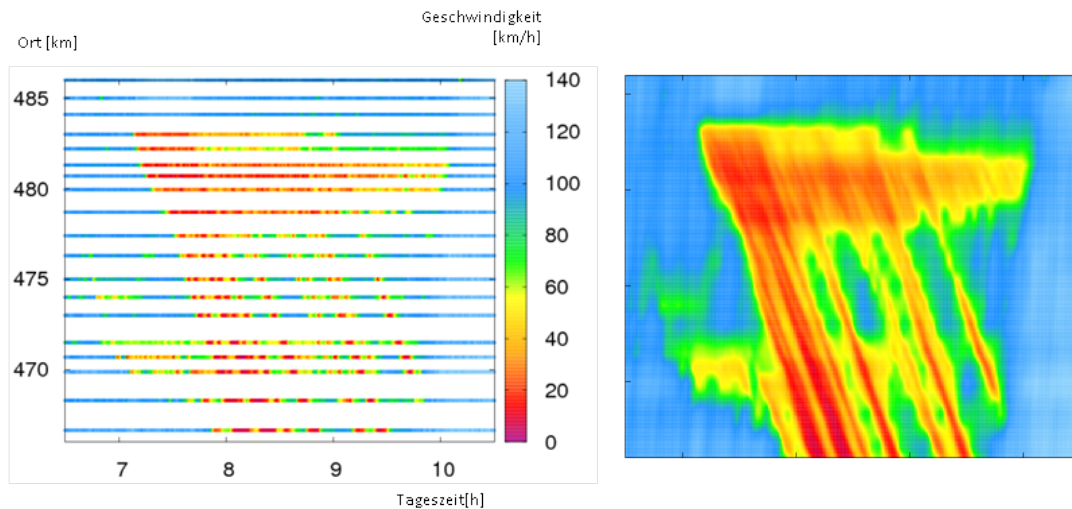


Abbildung 9 ASM als Interpolationsmethode für lokale Detektion (links: lokale Daten; rechts: mittels ASM interpolierte Daten)

Die Interpolationsmethode ASM verwendet zwei Glättungskerne, einen in stromabwärtiger Richtung, der Geschwindigkeitswerte in Fahrtrichtung mit der parametrierbaren Freiflussgeschwindigkeit propagiert, und einen in stromaufwärtiger Richtung, der Geschwindigkeitswerte gegen die Fahrtrichtung (in die Richtung der Stauausbreitung) propagiert. Beide Kerne werden abhängig von der Geschwindigkeit am Detektor kombiniert und ergeben ein raum-zeitliches Bild, wie in obiger Abbildung zu sehen. Gemessene Geschwindigkeitswerte gehen durch diese Glättung nicht verloren, sondern es werden Geschwindigkeitswerte zwischen Detektorpositionen interpoliert.

### 3.2.3 Beispiel

Abbildung 10 zeigt Überkopfsensorik-Daten in FR Nürnberg. In Rot sind Bereiche dargestellt, in denen die Staugeschwindigkeit  $v_{crit}$  unterschritten wird. Im Bereich zwischen km 400 (Anschlussstelle Allersberg) und km 480 (Autobahndreieck Holledau) ist keine Streckenbeeinflussung aktiv und daher werden dort keine Daten erfasst.

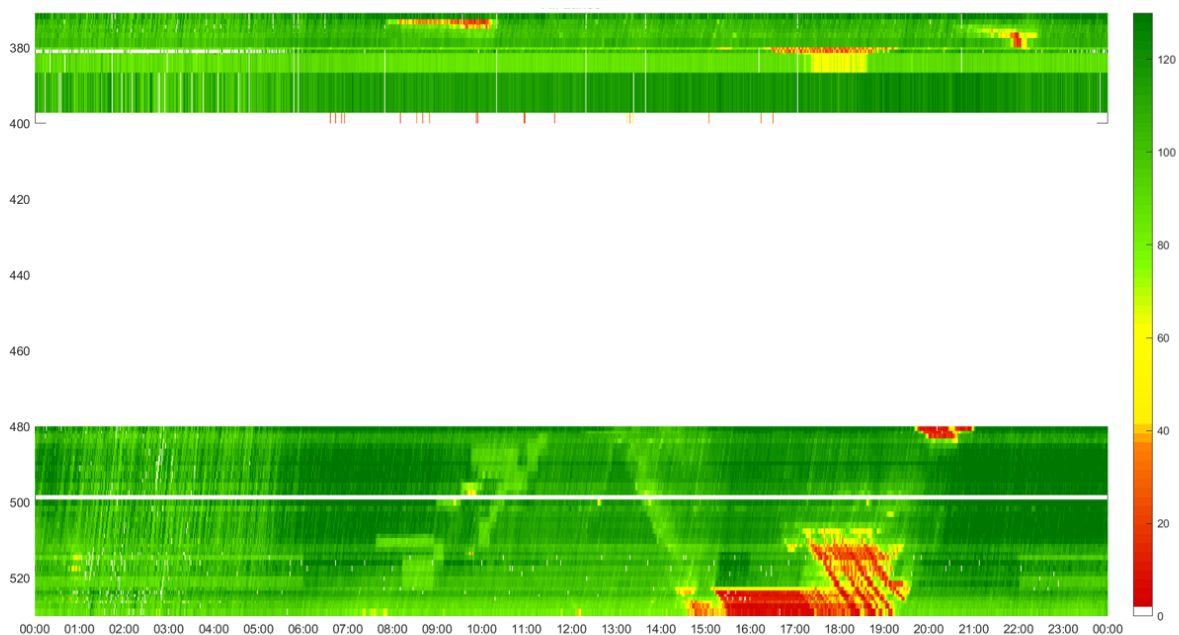


Abbildung 10 Aufbereitete Überkopfsensorik-Rohdaten vom 29.05.2019 in FR Nürnberg (in km/h)

### 3.3 Seitenradar

Seitenradar-Detektion ist ebenfalls fahstreifengenau verfügbar. Die Erfassung ist im Bereich um Ingolstadt im Abschnitt zwischen km 452 und km 465 bzw. km 469 aktiv, in FR Nürnberg zusätzlich noch ein Standort bei km 411. Je FR sind sechs Detektoren verbaut, die jeweils alle drei Fahrstreifen des Messquerschnitts erfassen.

#### 3.3.1 Datenformat und verfügbare Werte

Genau wie bei Überkopfsensorik-Daten werden auch durch Seitenradar gemittelte Geschwindigkeits- und kumulierte Verkehrsstärkewerte erfasst, ebenfalls in Intervallen von einer Minute. Die Standorte schwanken in der Qualität ihrer erfassten Daten teilweise. Beispielsweise melden manche Radargeräte kontinuierlich Staugeschwindigkeiten auf zwei von drei Fahrstreifen und keine Geschwindigkeiten ( $v = 0$ , da  $q = 0$ ) für den dritten Fahrstreifen. Dies wurde im Laufe des Projekts behoben. Für diese Analyse wurde ein Zeitraum ausgewählt, in dem die Daten plausibel erscheinen.

#### 3.3.2 Aufbereitung

Auch die Seitenradar-Daten wurden mit der ASM-Methode [6] interpoliert und ergänzt. Aufgrund der deutlich geringeren Standortanzahl im Vergleich zu den Überkopfsensorik-Daten wäre die Glättung aller Daten zu einer Verkehrslage allerdings teilweise verzerrend. Beispielsweise gibt es benachbarte Radargeräte mit einem Abstand von über 40 km. In diesen Fällen, abhängig von der Distanz der Detektoren, wurden die nichtinterpolierten Rohdaten im Projekt verwendet. Daher kann es vorkommen, dass einzelne Minuten des Tages (nachts) keine Geschwindigkeitswerte erkennen lassen, da kein Fahrzeug auf dem Fahrstreifen registriert wurde. Durch eine Interpolation würden die Geschwindigkeitswerte durch benachbarte Minutenwerte aufgefüllt.

#### 3.3.3 Beispiel

Folgende Abbildung 11 zeigt am gleichen Tag und in der gleichen Fahrtrichtung wie die Überkopfsensorik-Daten ein Beispiel für Seitenradar-Erfassung:

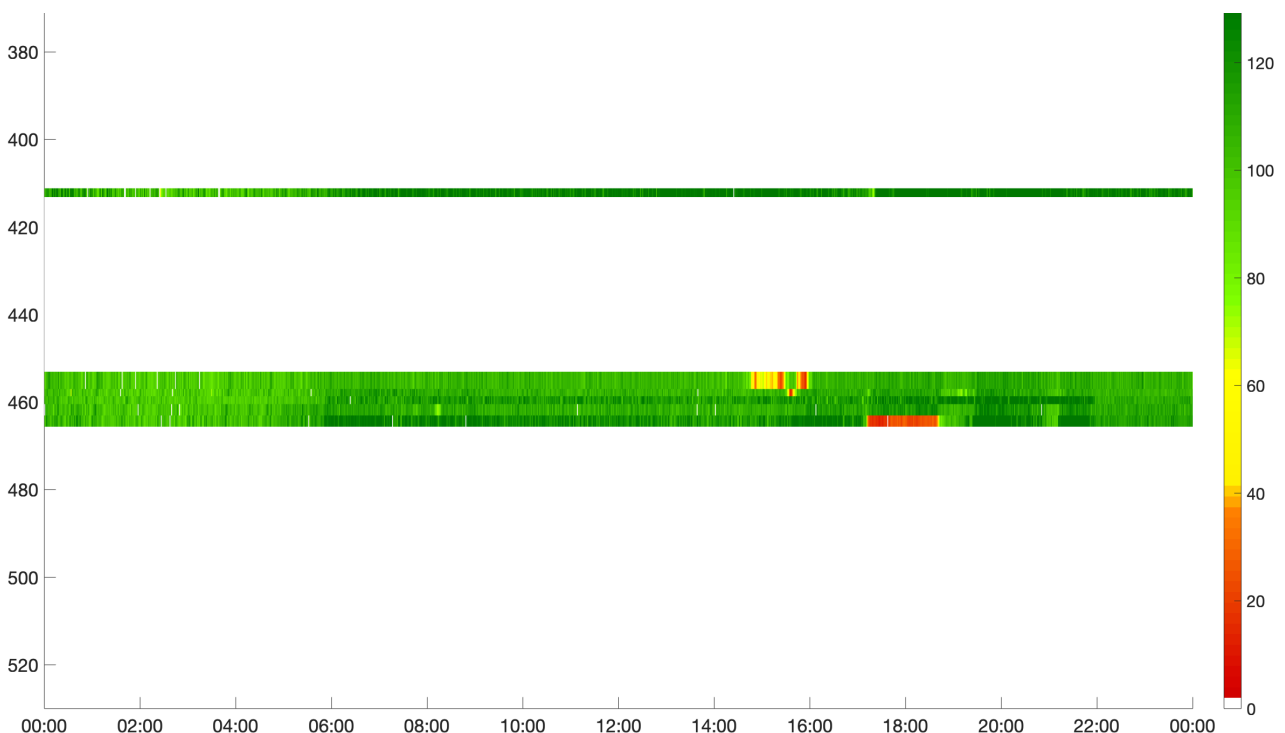


Abbildung 11 Aufbereitete Seitenradar-Rohdaten vom 29.05.2019 in FR Nürnberg (in km/h)

## 3.4 Floating-Car-Daten

Im Projekt wurden aktuelle FCD verwendet. Hoch aufgelöste Positionsdaten liefern zeitlich-räumliche Fahrzeugtrajektorien. Somit sind die Geschwindigkeiten der Fahrzeuge überall bekannt. Historische Daten wurden nicht verwendet. Die Übermittlungsfrequenz der Live-FCD hängt vom Fahrzeugmodell ab. Außerdem hängt die Datenmenge von der Durchdringungsrate ab. Insgesamt konnten in zahlreichen Projekten im Verdichtungsraum München und auf der A9 sehr gute Erfahrungen bezüglich der Genauigkeit mit der Anzahl bzw. Verfügbarkeit der FCD gemacht werden [7]. FCD sind nicht fahrstreifenfein verfügbar.

### 3.4.1 Datenformat und verfügbare Werte

Die FC-Rohdaten wurden in einem äquidistant unterteilten Gitter von einer Minute und 100 m bereitgestellt. Sobald ein Fahrzeug durch die entsprechende raum-zeitliche Zelle gefahren ist, konnte dieser Geschwindigkeitswert der Zelle zugewiesen werden. Im Fall, dass mehrere Fahrzeuge eine Zelle durchqueren, wird das harmonische Mittel der Geschwindigkeiten verwendet. In den Artikeln [8] und [9] wird das Datenformat, das auch in diesem Projekt verwendet wurde, ausführlich beschrieben. Die Daten liegen in einer sehr guten Qualität vor, sind allerdings aufgrund der feinen Unterteilung des Gitters nur spärlich vorhanden. Das heißt, viele Zellen werden ohne Geschwindigkeitswerte geliefert. Durch eine entsprechende Dateninterpolation werden die Geschwindigkeitsmatrizen aufgefüllt. FCD liefern keine unplausiblen Rohdaten, auch aufgrund der Spärlichkeit.

### 3.4.2 Aufbereitung

Diese mobilen Detektoren werden mit einer speziell für FCD entwickelten Glättungsmethode interpoliert, die sog. *phase-based smoothing method* (PSM, [7]). Diese Interpolationsmethode versucht anhand der 3-Phasen-Theorie von Kerner die Phasen Freifluss, synchronisierten Verkehr und breiten, sich bewegendem Stau zu identifizieren und dementsprechend die Geschwindigkeiten zu propagieren. GPS-Trajektorien von FCD werden in Bereichen ohne Trajektorien (siehe Abbildung 12) interpoliert, bestehende GPS-Messungen werden nicht verändert. Das Ergebnis sind zeitlich-räumliche Geschwindigkeiten in einem Gitter von 1 Minute und 500 m, wie auch bei der lokalen Detektion.

### 3.4.3 Beispiel

Folgende Abbildung 12 zeigt am gleichen Tag und in der gleichen Fahrtrichtung wie die Überkopfsensorik- und die Seitenradar-Daten ein Beispiel für FCD. Dabei sind etwa 80% der Zellen ohne Geschwindigkeitsangabe (weiß dargestellt).



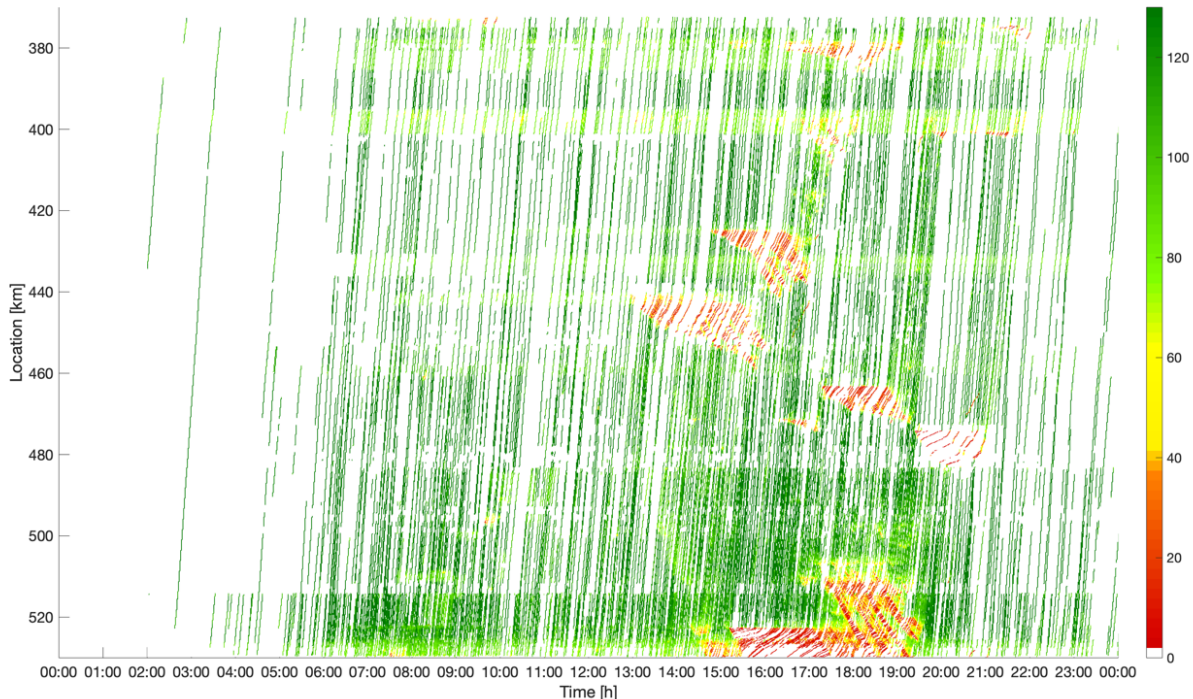


Abbildung 12 Aufbereitete FCD-Rohdaten vom 29.05.2019 in FR Nürnberg (in km/h)

## 3.5 Bluetooth

Bluetooth-Detektionen sind Reisezeitmessungen von Bluetooth-Geräten an verschiedenen Standorten. Über den Abgleich der jeweiligen Zeitstempel und die bekannte Distanz zwischen den Standorten kann eine räumliche Geschwindigkeit ermittelt werden. Die Erkennung ist nicht fahrstreifenfein und der genaue Erfassungsort hat eine räumliche Unschärfe, die sich in leichten Geschwindigkeitsunterschieden darstellen kann, die aber für die meisten Analysen keine Auswirkungen haben. Entlang der betrachteten Autobahn sind 35 Bluetooth-Scanner aktiv mit einem durchschnittlichen Abstand von 4,6 km. Ein Scanner erfasst stets beide Fahrrichtungen.

### 3.5.1 Datenformat und verfügbare Werte

Die Filteralgorithmen, die im Rahmen vom Projektvorgänger iRoute 1 [10] und dem Bluetooth-Gutachten [11] entwickelt wurden, wurden auch in diesem Projekt angewendet [12], [13], [14], [15]. Die zeitliche Erfassung ist sekundengenau. Bis auf wenige Ausnahmen (ca. 5 % der Datensätze) liefern alle Messstandorte durchgehend plausible Daten.

### 3.5.2 Aufbereitung

In der Literatur wurde bislang kein Algorithmus vorgestellt, der Reisezeiten über große Distanzen auf ein Geschwindigkeitsgitter überträgt. Im Bluetooth-Gutachten wurden Filteralgorithmen diskutiert. Im Rahmen von iRoute2 wurde ein Glättungsalgorithmus (*LTSM – Low-Resolution Travel Time Smoothing Method*) entwickelt. Die Herleitung des mathematischen Modells des Glättungsalgorithmus kann im Artikel [16] nachgelesen werden.

Abbildung 13 zeigt die Rohdaten eines Tages in FR Nürnberg. Jede Linie steht dabei für eine Fahrt, also für ein Fahrzeug, das an zwei Bluetooth-Scannern erfasst wurde. Wenn ein Fahrzeug nur an einem Scanner detektiert wurde, wird es nicht betrachtet, da aus einer einzelnen Messung keine Fahrtrichtung abgeleitet werden kann. Wird ein Fahrzeug an mehr als zwei Standorten erfasst, wird die Fahrt in Abschnitte aufgeteilt, da in jedem Erfassungssegment unterschiedliche Geschwindigkeiten gefahren worden sein können.

Der LSTM-Algorithmus belegt nun die Rohdaten mit einem raum-zeitlichen Gitter, in diesem Beispiel (Abbildung 14) mit einem Gitter der Größe 1 min  $\times$  500 m. Innerhalb jeder Zelle wird eine durchschnittliche Geschwindigkeit aller Fahrzeuge, die diese Zelle durchquert haben, ermittelt.

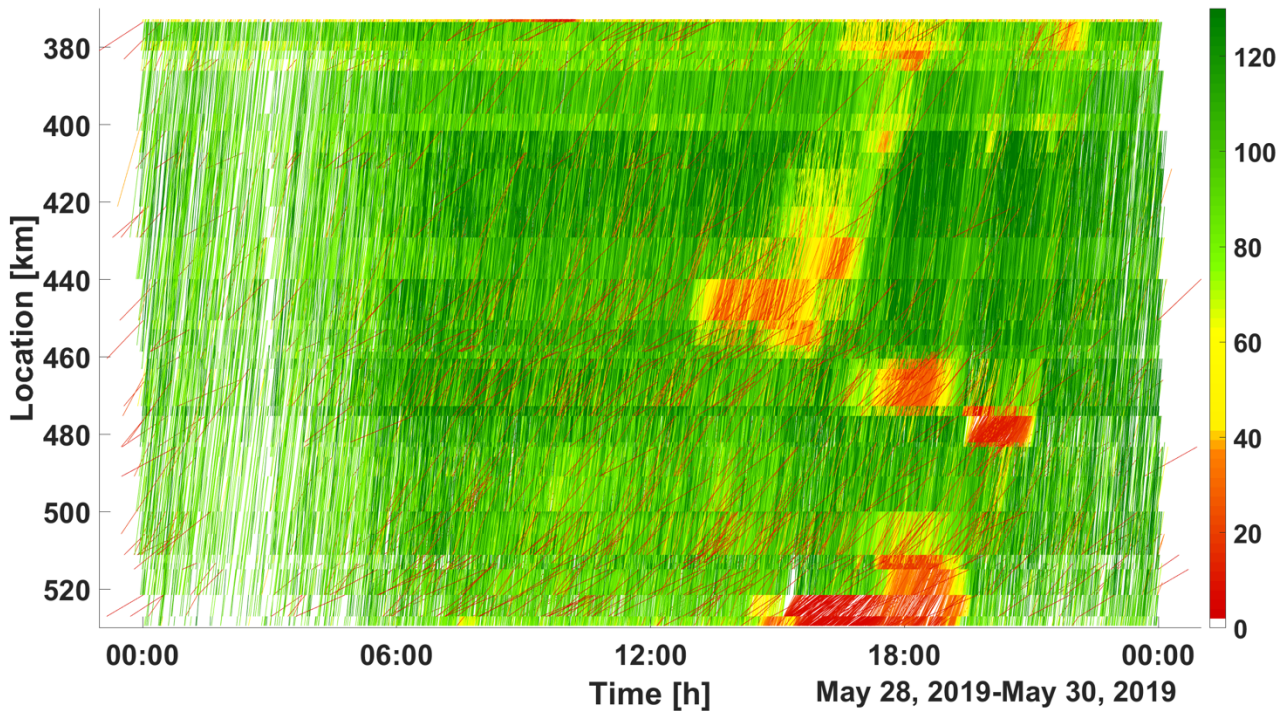


Abbildung 13 Aufbereitete BT-Rohdaten vom 29.05.2019 in FR Nürnberg (in km/h)

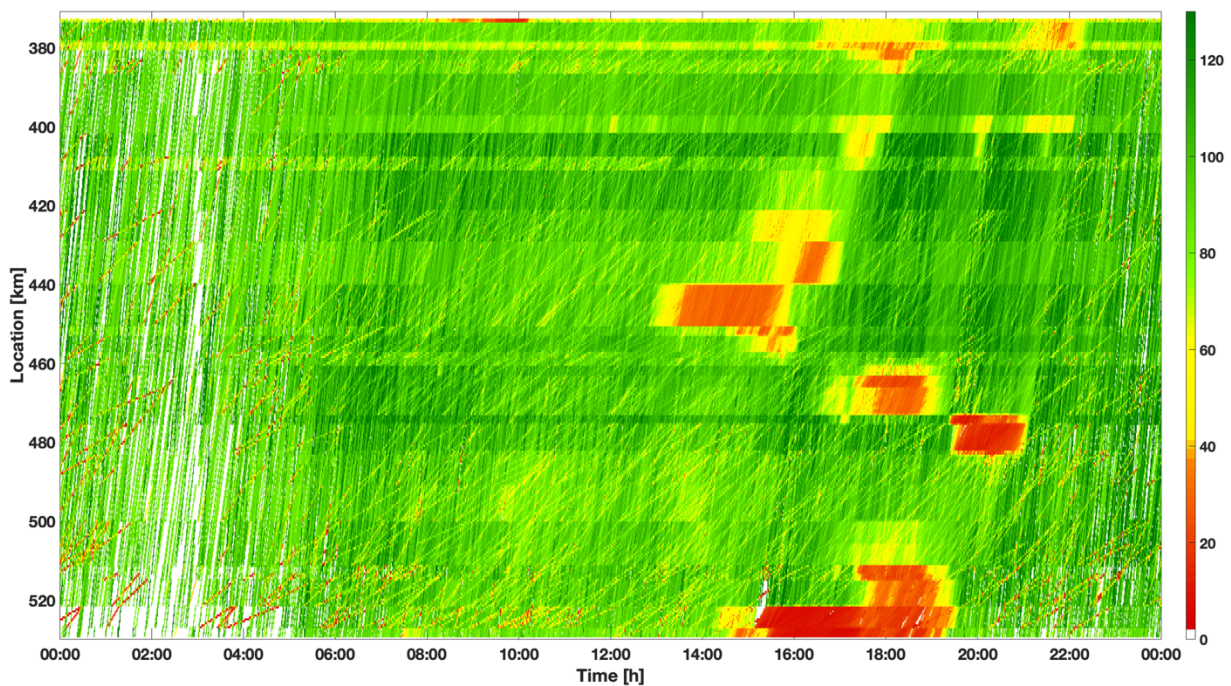


Abbildung 14 Mittels LSTM geglättete BT-Geschwindigkeitsdaten vom 29.05.2019 in FR Nürnberg (in km/h)

### 3.5.3 Beispiel

Auch aus den BT-Daten wird ein Geschwindigkeitsfeld vom 29.05.2019 analog zu Überkopfsensorik-, Seitenradar- und FC-Daten in FR Nürnberg erstellt (Abbildung 14).

## 4 Datenfusion und „Gold-Standard“

Auf Basis der aufbereiteten und bereinigten Daten aus Überkopfsensorik-, Seitenradar-, FCD- und Bluetooth-Detektion wurde eine fusionierte Darstellung der Verkehrslage erstellt. Dieses fusionierte Geschwindigkeitsfeld soll die Grundlage für weitere Betrachtungen als „Gold-Standard“ repräsentieren.

Da in dieser Studie nur wenige Tage mit qualitativ guten Daten aller Detektionsarten zur Verfügung standen, kann die Fusion nur eingeschränkt angewendet werden. Bei zukünftigen Projekten ist zu erwägen, eine längere Projektlaufzeit zu veranschlagen, um eventuelle Datenlücken besser abfedern zu können, vergleiche auch Kapitel 7 „Gewonnene Erkenntnisse zur Datenqualität“.

### 4.1 Fusionsansätze

Im Folgenden werden kurz vier verschiedene Fusionsansätze vorgestellt. Dies sind im Wesentlichen Weiterentwicklungen der Artikel [17], [18], [19] und [20]. Ein Vergleich verschiedener Sensorausstattung und -kombinationen wurde auf einem Teilstück von 40 km im Bereich des Verdichtungsraums München mit Überkopfsensorik-Detektion beispielhaft von Daten am 29.05.2019 in FR Nürnberg durchgeführt und ist im Artikel [8] beschrieben. Darin wird eine Verkehrslagerekonstruktion erläutert, die parallel möglichst genaue Geschwindigkeiten und Reisezeiten optimiert, wenn Daten aus verschiedenen Quellen (Überkopfsensorik („LOOP“), FCD, Bluetooth („BT“)) vorliegen. Die Rohdaten der stationären, mobilen und streckenbezogenen Erfassung sind in den folgenden Abbildungen dargestellt.

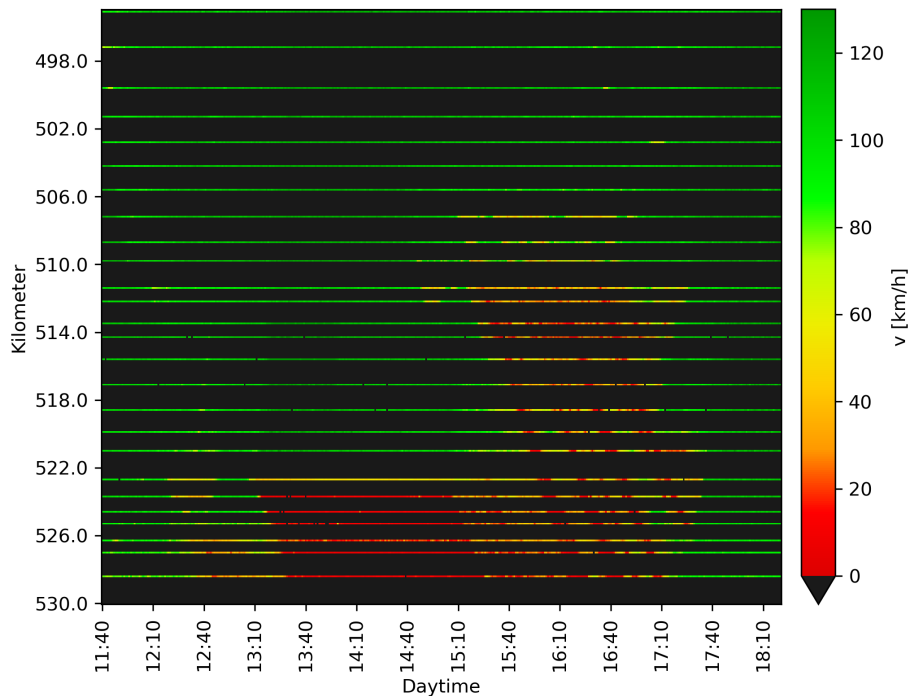


Abbildung 15 Rohdaten aus stationärer Sensorik

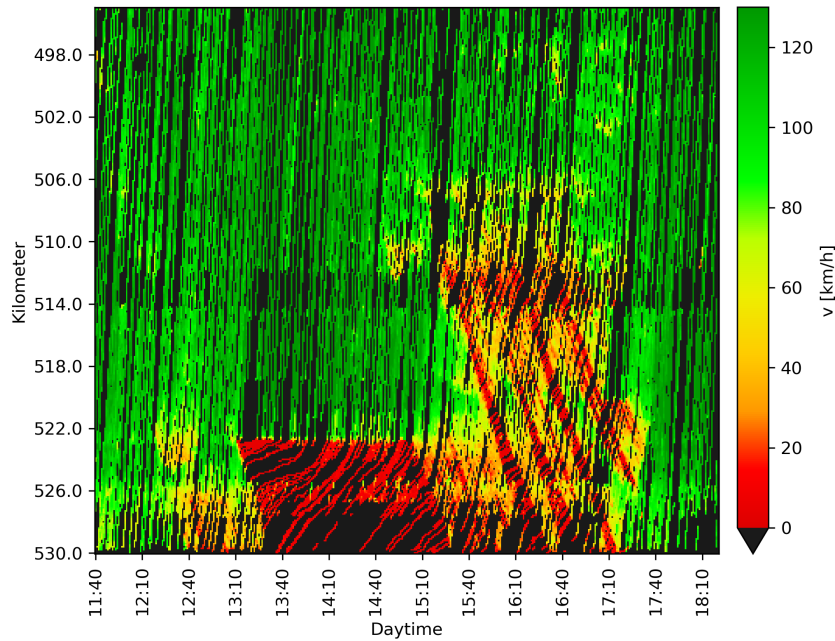


Abbildung 16 Rohdaten aus mobiler Sensorik

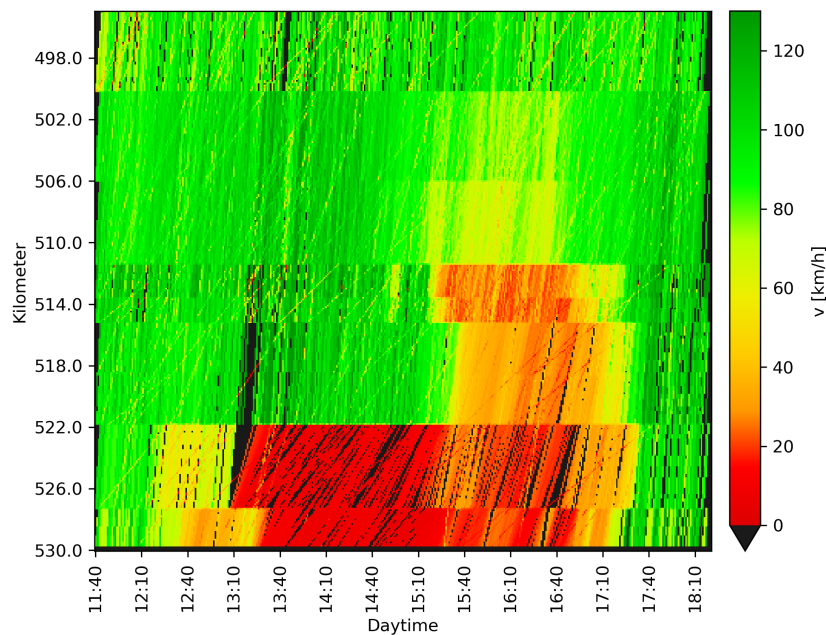


Abbildung 17 Rohdaten aus streckenbezogener Sensorik

Es werden im Artikel vier verschiedene Fusionsmethoden gegenübergestellt, darunter die klassische Herangehensweise, durchschnittliche Geschwindigkeitswerte aller Datenquellen für Streckensegmente zu berechnen („SEC-AVG“, section-average). Daneben werden mit der ASM und der PSM zwei Algorithmen angewendet, die bereits in Kapitel 3 erläutert wurden.

Als vierte Methode ist eine Variante der PSM mit Gewichtungsfaktoren beschrieben („PSM-W“). Dabei werden den Bluetooth-Reisezeiten Gewichte zugewiesen, je nach Zuverlässigkeit einer gemessenen Fahrzeugreisezeit. Wenn eine Reisezeit sehr zuverlässig ist, geht sie stärker in die Geschwindigkeitsrekonstruktion mit ein, eine unzuverlässige Reisezeit wird kaum beachtet. Im Wesentlichen basiert die Gewichtung darauf, dass eine sehr lange Reisezeit zuverlässig auf eine niedrige Durchschnittsgeschwindigkeit hinweist, und eine kurze Reisezeit nur mit einer durchgehend hohen Geschwindigkeit realisierbar ist. Wenn die Reisezeit weder lang noch kurz ist, gibt es sehr viele Möglichkeiten für ein Geschwindigkeitsprofil im betrachteten Segment. Dadurch ist die Zuverlässigkeit

eines realisierten Geschwindigkeitsverlaufs gering und diese Reisezeit wird bei der Verkehrslage weniger stark berücksichtigt. Folgende Abbildungen zeigen die Ergebnisse mit den vier verschiedenen Fusionsmethoden.

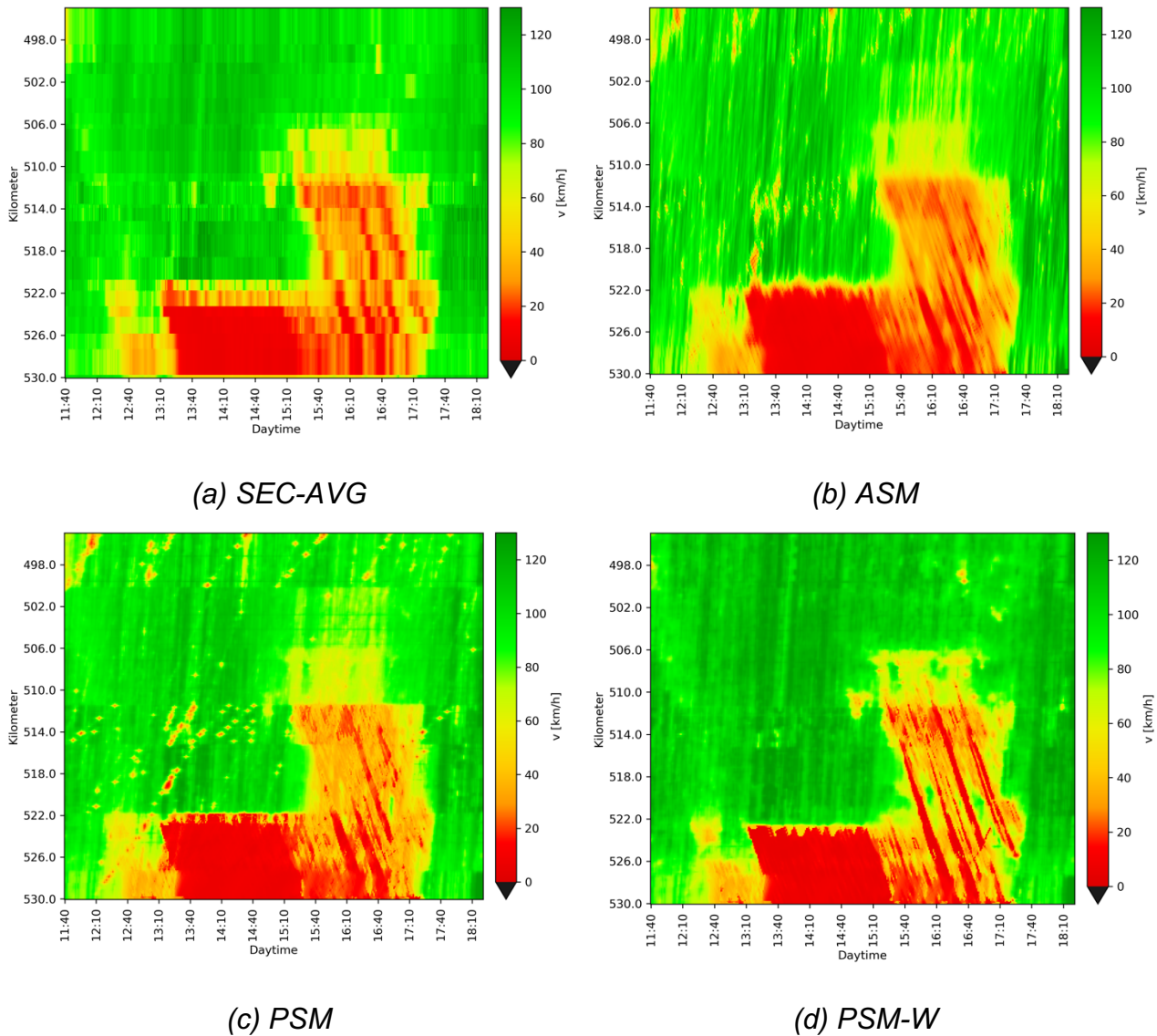


Abbildung 18 Interpolierte, fusionierte Daten

Die Ergebnisse der vier Interpolationsmethoden werden anhand von zwei Standardfehlerschätzern bewertet, zum einen IMAE (Inverse Mean Average Error), zum anderen MAPE (Mean Absolute Percentage Error).

$$IMAE = \frac{1}{|v_{i,j}|} \sum_{(i,j)} \left| \frac{1}{v_{i,j}} - \frac{1}{v_{i,j}^E} \right|$$

$$MAPE = \frac{1}{n_{BT}} \sum_{i=1}^{n_{BT}} \left| \frac{VTT_i - TT_i}{TT_i} \right|$$

Dabei werden die jeweils verfügbaren Daten hälftig in ein Trainings- und ein Testset aufgeteilt und miteinander verglichen. IMAE ist ein Vergleichsmaß von Geschwindigkeitsabweichungen, MAPE bewertet virtuelle Reisezeiten (VTT) gegenüber BT-Reisezeiten (TT).

Als Datenbasis wird jede Kombination von LOOP, FCD und BT untersucht und jeweils die vier Fusions- bzw. Rekonstruktionsmethoden betrachtet. Die Ergebnisse sind in den folgenden beiden Abbildungen dargestellt, siehe auch [8].

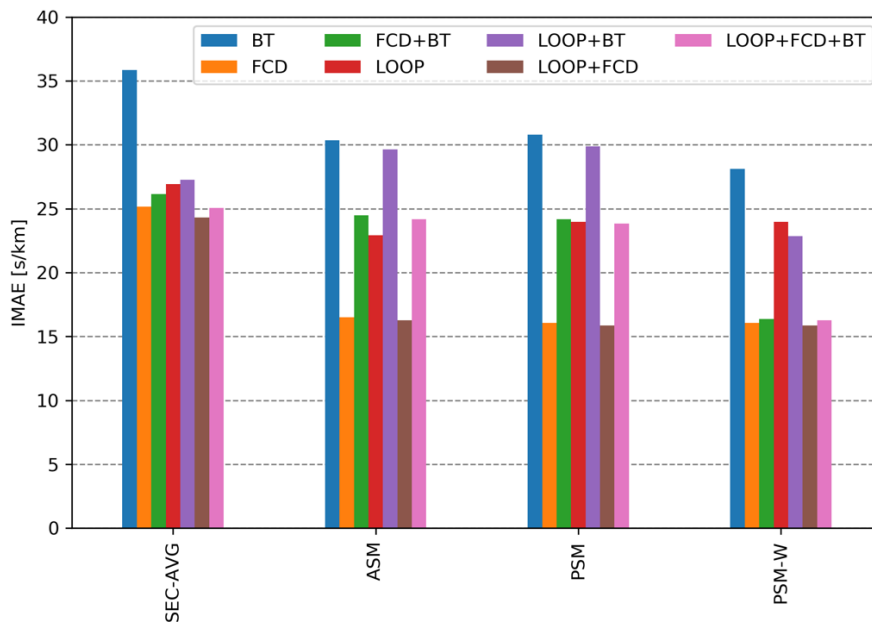


Abbildung 19 Durchschnittlicher IMAE je Datenlage und Fusionsmethode

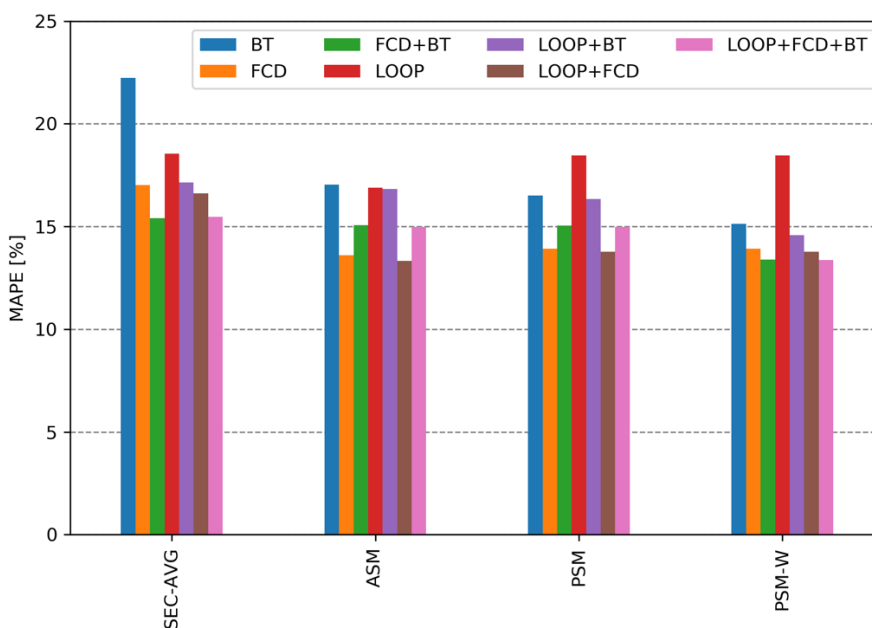


Abbildung 20 Durchschnittlicher MAPE je Datenlage und Fusionsmethode

Die Ergebnisse zeigen geringste Fehler für die Fusionsmethode „PSM-W“, insbesondere bei den Kombinationen mit mobiler Erfassung. Die Ausstattung von lokaler und mobiler Erfassung (braun) wurde als beste Variante ermittelt, als zweitbeste eine Ausstattung mit lokaler, mobiler und streckenbezogener Erfassung (pink). Die Kombination von mobiler und streckenbezogener Erfassung sowie auch die alleinstehende mobile Erfassung rekonstruieren die Verkehrslage besser als Kombinationen ohne FCD.

## 4.2 Gold-Standard

Abbildung 21 zeigt die Anwendung auf den gesamten Streckenabschnitt, die resultierenden fusionierten Geschwindigkeiten am 29.05.2019 in Fahrtrichtung Nürnberg.

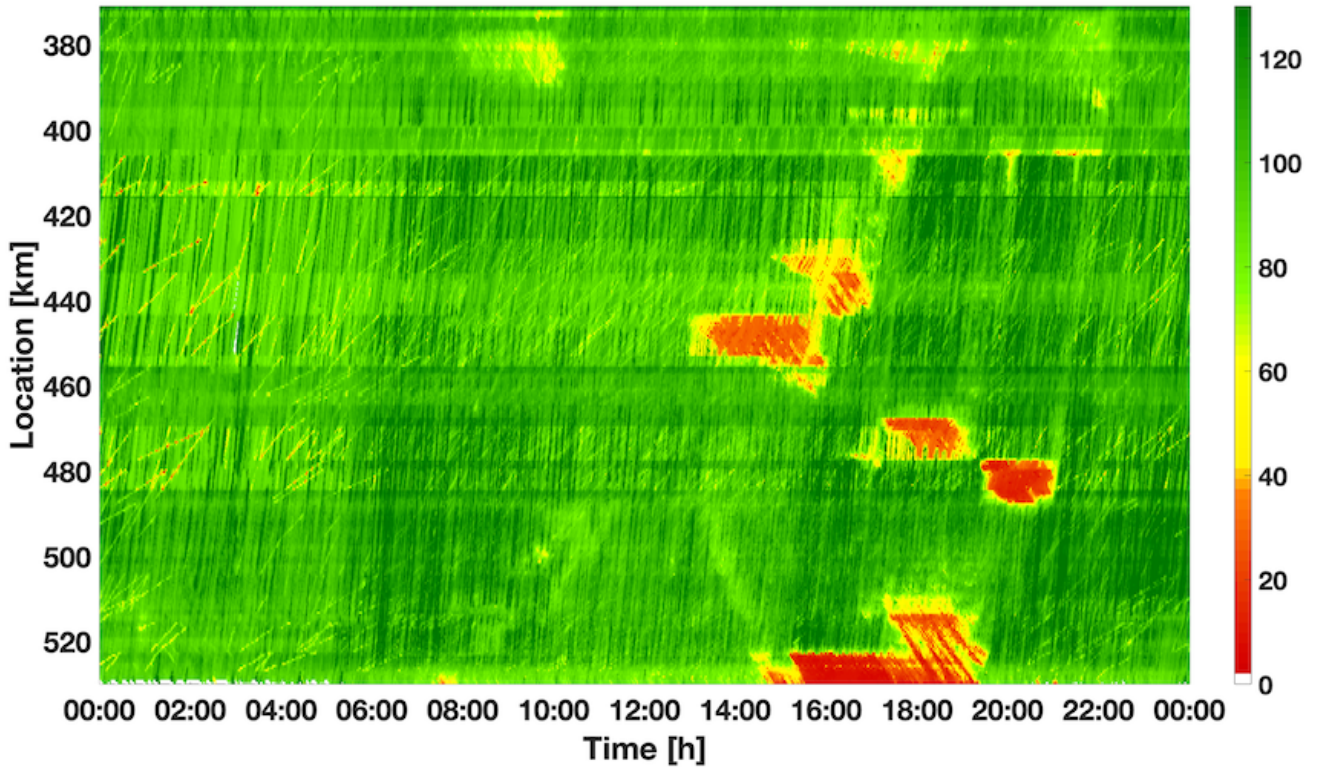


Abbildung 21 Fusionierte Geschwindigkeit vom 29.05.2019 in FR Nürnberg (in km/h)

## 5 Vergleiche und Bewertung

Die Vergleiche der Sensoriken werden nachfolgend durch die Erkennung der einzelnen Stautypen bewertet. Die Erkennung unterschiedlicher Stautypen beschreibt ein Maß der Stauanfälligkeit. Je spezifischer ein Stau als ein gewisser Stautyp erkannt wird, desto besser kann die Verkehrssteuerung darauf eingehen, beispielsweise bei Umleitungsempfehlungen. Durch die Kenntnis des vorherrschenden Stautyps können Prognosen vereinfacht werden, da die voraussichtliche Dauer der Stauung abschätzbar wird.

Basierend auf den Stautypen, die in Kapitel 2.4 beschrieben sind, wird im Folgenden die Erkennung der Stautypen und der Stauschwerpunkte beschrieben. Da in diesem Forschungsprojekt die Analyse von Stauhäufungspunkten im Vordergrund steht, bei der auch stockender Verkehr betroffen ist, wurde bei den nachfolgenden Berechnungen mit einer Staugrenzgeschwindigkeit  $v_{crit}$  von 40 km/h gerechnet.

### 5.1 Stautypenerkennung

Die Stautypenerkennung ermittelt für eine raum-zeitlich diskretisierte Geschwindigkeitsverteilung mögliche Stauungen und deren jeweiligen Stautyp. Für die Ermittlung eines Staus wurde die Clusterfindung gemäß den in [3] und [4] beschriebenen Algorithmen angewendet (Abbildung 22, Schritt 1), die im Folgenden dargestellt wird.

Zellen mit einer Geschwindigkeit unterhalb eines parametrierbaren Schwellwerts  $v_{crit}$  werden in Cluster zusammengefasst, wenn Zellen benachbart sind (Abbildung 22, Schritt 2). Um nicht zu viele, sehr kleine Cluster zu erhalten, werden mehrere Cluster zusammengefasst, sobald der Abstand zwischen beiden Clustern nicht mehr als eine Reisezeit  $t_{merge}$  (z. B. 4 min) beträgt (Abbildung 22, Schritte 3 und 4). Ein Cluster wird als konvexe Hülle der gestauten Zellen aufgefasst.

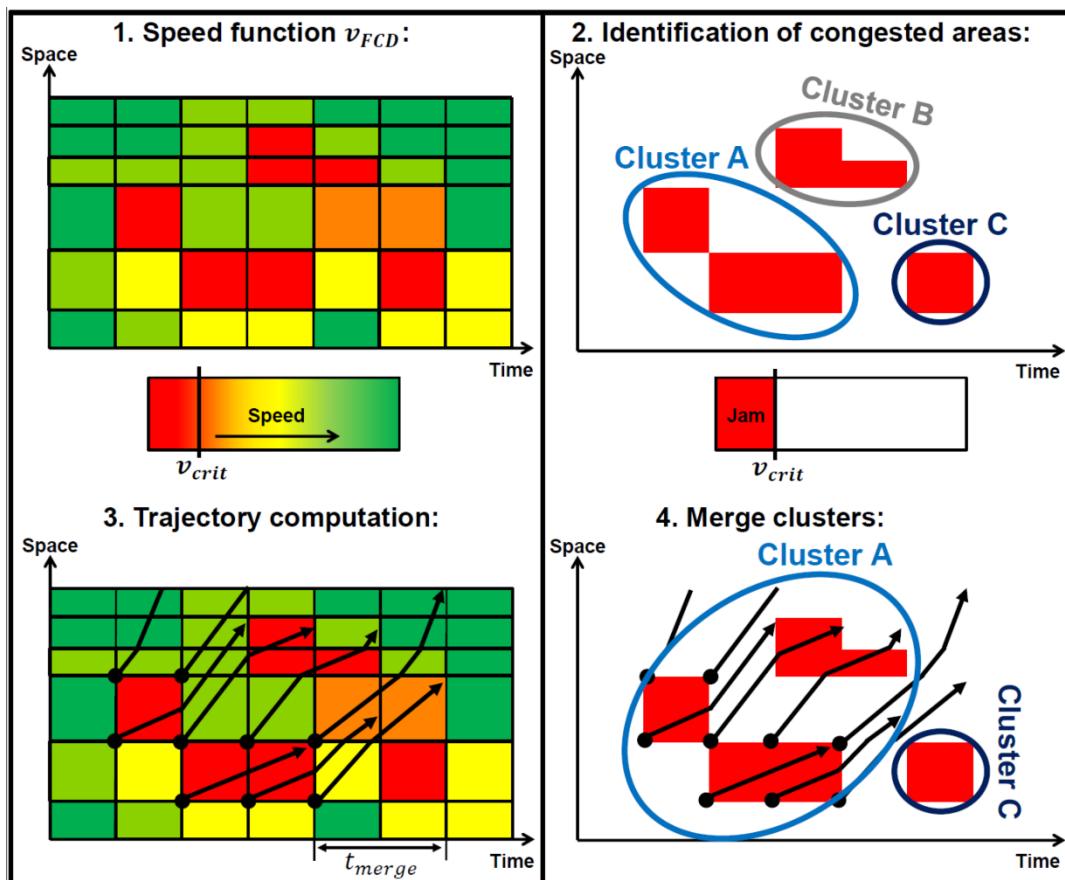


Abbildung 22 Clusterbildung [3] [4] [5]



Basierend auf dieser Clusterbildung wurde eine automatische Stautypenermittlung mittels virtueller Trajektorien durchgeführt. Über die Zeit und die Häufigkeit, die ein virtuelles Fahrzeug in einer gegebenen Verkehrssituation die Staugrenzzgeschwindigkeit unterschreitet, lässt sich jeder so erhaltenen virtuellen Trajektorie ein eindeutiger Stautyp zuordnen, siehe auch Kapitel 2.4. Das gefundene Cluster wird dabei in eine Umgebung mit Freifluss-Bedingungen eingebettet, d.h. die Geschwindigkeiten innerhalb der konvexen Hülle werden wie ermittelt betrachtet, alle anderen Zellen des raumzeitlichen Gitters werden auf die Freiflussgeschwindigkeit 120 km/h gesetzt, so dass jede Trajektorie nur ein Stacluster durchfährt.

Alle identifizierten Stauereignisse, die dabei nicht einem der vier Stautypen zugeordnet werden können, werden einer Kategorie „Mixed“ zugeordnet. Dies kann beispielsweise vorkommen, wenn vier Trajektorien durch das gleiche Cluster fahren und dabei je zwei Trajektorien einen Stautyp haben. Das gesamte Cluster erhält dann weder den einen noch den anderen Stautyp, sondern wird als „Mixed“ klassifiziert.

Die Auswertungen zeigen, dass nicht jeder Stautyp von jeder Erfassungstechnologie gleich gut erkannt wird. Dabei werden beispielsweise eine hohe Detektionsrate, eine niedrige Fehlalarmrate sowie eine gute zeitlich-räumliche Erkennung untersucht. Im Folgenden werden beispielhaft für den 29.05.2019 in FR Nürnberg die Stautypen ermittelt. Dieser Tag wurde je Datenquelle in den Abbildungen Abbildung 10, Abbildung 11, Abbildung 12, Abbildung 14 und Abbildung 21 dargestellt.

### 5.1.1 Überkopfsensorik-Daten

Überkopfsensorik-Daten aus Überkopf-Sensorik erkennen an diesem Tag vier Staumuster, 1x Stop&Go (violett), 1x Breiter Stau (türkis), 1x Mega-Stau (weiß), 1x Mixed (blau) (Abbildung 23). Der Bereich zwischen km 400 und km 480 ist nicht mit Überkopf-Sensorik ausgestattet, daher wird in diesem Bereich für die Clusterfindung freier Verkehr angenommen.

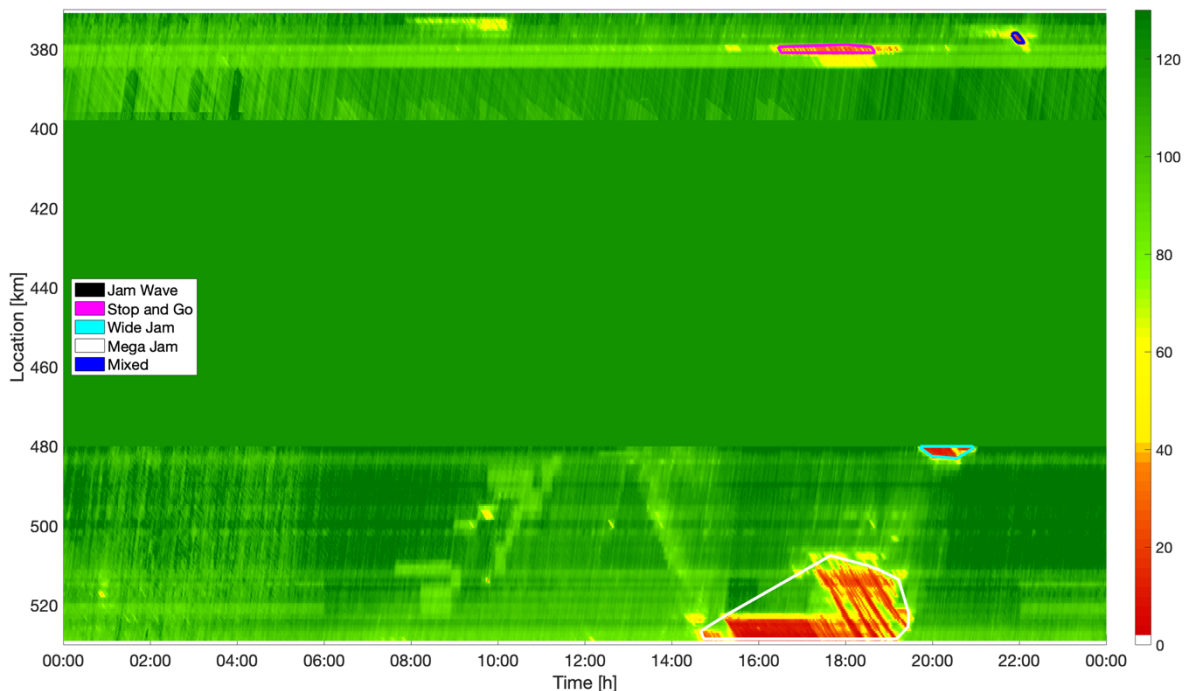


Abbildung 23 Stautypen aus Überkopfsensorik-Daten vom 29.05.2019 in FR Nürnberg (in km/h)

### 5.1.2 Seitenradar-Daten

Seitenradar-Daten erkennen drei Staumuster, 1x Stauwelle (schwarz), 1x Breiter Stau (türkis), 1x Mixed (blau), siehe Abbildung 24. Die Fläche zwischen den detektierten Bereichen (bei km 411 gibt es ein einzelnes Seitenradar-Gerät) wird wieder als freier Verkehr interpretiert, um keine Staus fälschlicherweise zu klassifizieren.

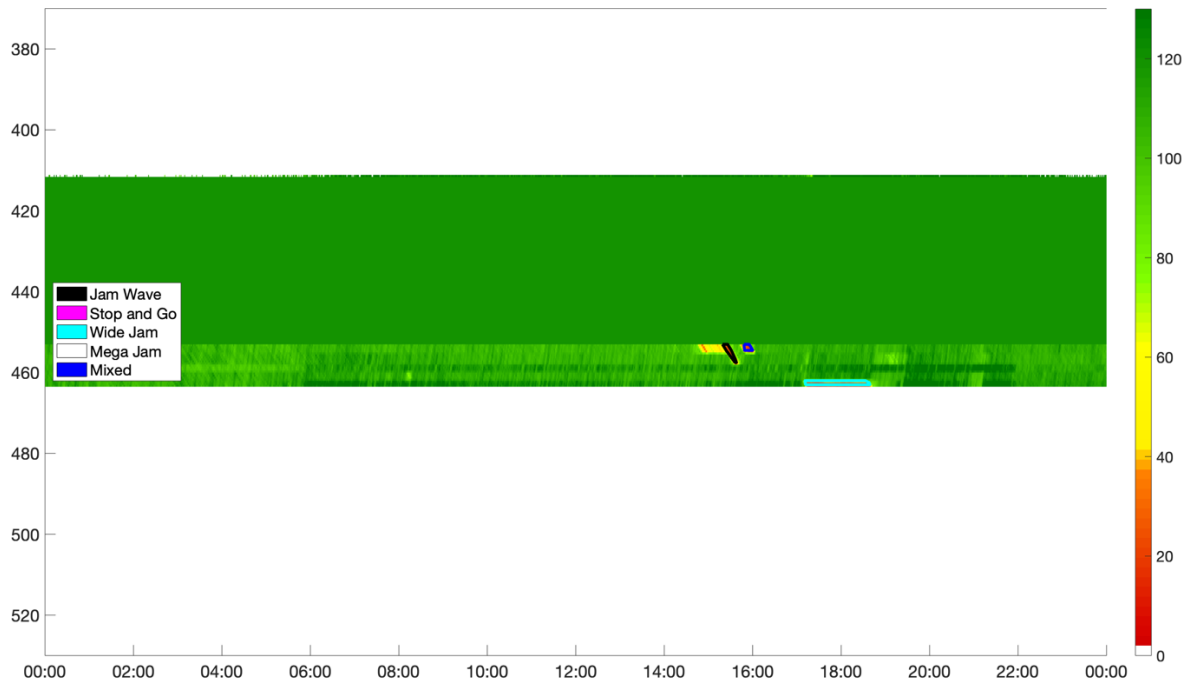


Abbildung 24 Stautypen aus Seitenradar-Daten vom 29.05.2019 in FR Nürnberg (in km/h)

Da sowohl Überkopfsensorik als auch Seitenradar lokale Verkehrsdaten erfassen und sich deren Erfassungsgebiete nicht überschneiden, werden sie für die Ermittlung der Stautypenhäufungspunkte zusammengefasst und mit SDD (stationary detector data) abgekürzt. Zusammen erkennen die lokalen Erfassungsarten demnach sieben Staumuster – eine Stauwelle, einen Stop&Go-Verkehr, zwei Breite Staus, einen Mega-Stau und zwei Mixed-Cluster.

### 5.1.3 Floating-Car-Daten

FCD erkennen 11 Staumuster: 3x Stauwelle (schwarz), 5x Stop&Go (violett), 1x Breiter Stau (türkis), 2x Mega-Stau (weiß) (Abbildung 25). Hier gibt es keine Orte ohne Detektion, lediglich der Bereich zwischen 0:00 und 2:00 Uhr ist aufgrund der Verschiebung UTC-Zeit zur lokalen Zeit nicht erfasst. In den Nachtstunden bis ca. 6:00 Uhr ist die Datenlage der FCD mit wenigen detektierten Trajektorien kaum aussagekräftig, so dass großflächige Bereiche mit gleichen Geschwindigkeiten dargestellt werden. Ab 6:00 Uhr sind dann hinreichend viele Fahrzeuge unterwegs, um eine realistische Verkehrslage zu rekonstruieren. Für die Erkennung und die Klassifikation von Störfällen ist der Anfang des Tages nicht relevant.

Auffällig ist, dass durch FCD deutlich mehr Stop&Go-Verkehr erkannt bzw. klassifiziert wird. Dieser wird hauptsächlich in den nicht durch Überkopfsensorik-Erfassung ausgestatteten Bereichen detektiert.

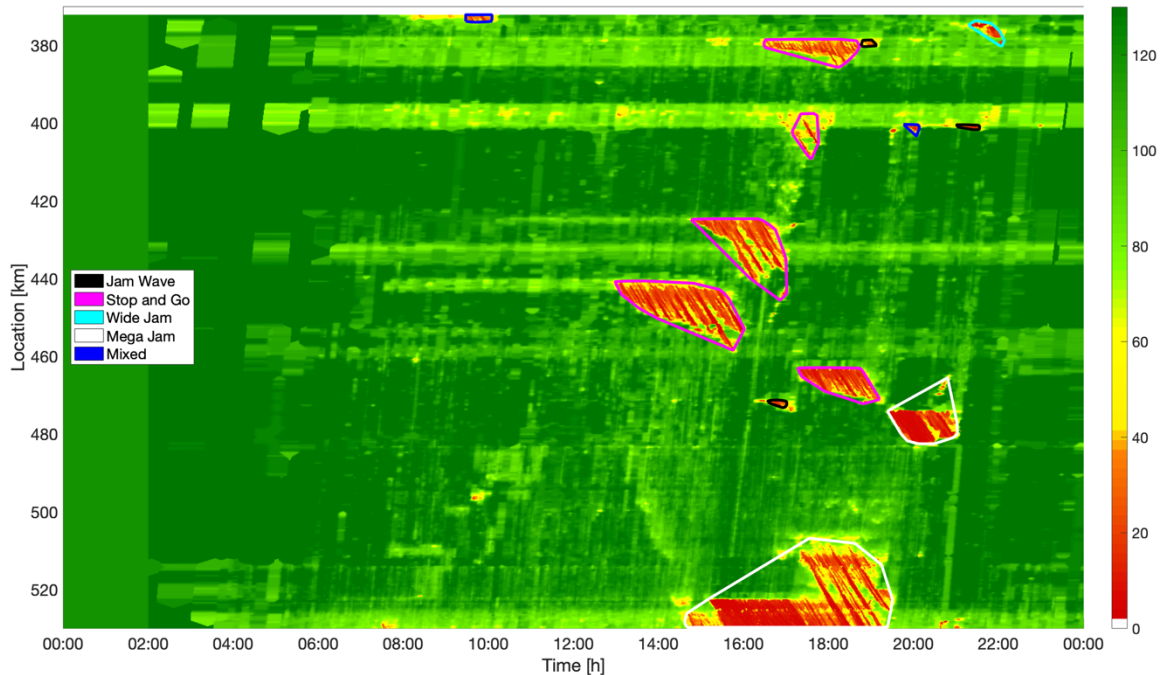


Abbildung 25 Stautypen aus Floating-Car-Daten vom 29.05.2019 in FR Nürnberg (in km/h)

### 5.1.4 Bluetooth-Daten

Bluetooth-Daten erkennen 10 Staumuster: 1x Stauwelle (schwarz), 5x Stop&Go (violett), 2x Breiter Stau (türkis), 2x Mega-Stau (weiß) (Abbildung 26). Auffällig ist hier, dass nur eine Stauwelle erkannt wird. Durch die Reisezeitmessungen kann ein Stau erst als solcher erkannt werden, wenn das Fahrzeug am zweiten Scanner vorbeigefahren ist und erkannt wurde. Eine Stauwelle breitet sich gegen die Fahrtrichtung stromaufwärts aus, die Reisezeiten bei Bluetooth-Erfassung werden aber in Fahrtrichtung gemessen.

Bei einem nur kurzen Geschwindigkeitseinbruch beeinflusst dies nur einen kleinen Teil der Segmentlänge, da vor oder nach dem Geschwindigkeitseinbruch wieder freier Verkehr herrscht. Für die mittlere Geschwindigkeit im Segment kann dies bedeuten, dass im Durchschnitt die Staugeschwindigkeit nicht unterschritten und gar kein Stau detektiert wurde. Eine Erkenntnis dieser Studie ist, dass Bluetooth-Messungen weniger geeignet sind, Stauwellen zu erfassen. Bei Stop&Go, Breitem Stau oder Mega-Stau wird die räumliche Geschwindigkeit realer wiedergegeben, da der Verkehr gleichmäßig und länger anhaltend gestaut ist.

Stop&Go-Verkehr wird oft in den Nachstunden detektiert. Dies sind Artefakte der Interpolationsmethode aufgrund der Lücken zwischen Reisezeitmessungen. Wenn Fahrzeuge eine Fahrtunterbrechung (beispielsweise LKW-Lenkpausen) und damit eine lange Reisezeit zwischen zwei Sensoren aufweisen, ist die mittlere Geschwindigkeit entsprechend niedrig. Wenn in der Nacht nur wenige Fahrzeuge unterwegs sind, mitteln sich diese niedrigen Geschwindigkeiten nicht heraus, sondern bleiben als Staumeldung bestehen. Zu einer Identifikation von Stauclustern wie in dieser Studie ist es ausreichend, die Nachtstunden nicht zu betrachten. Bei einer operativen Verkehrssteuerung nur basierend auf Bluetooth-Daten muss im Vorhinein die Methodik auf den genauen Zweck der Verkehrserfassung angepasst werden.

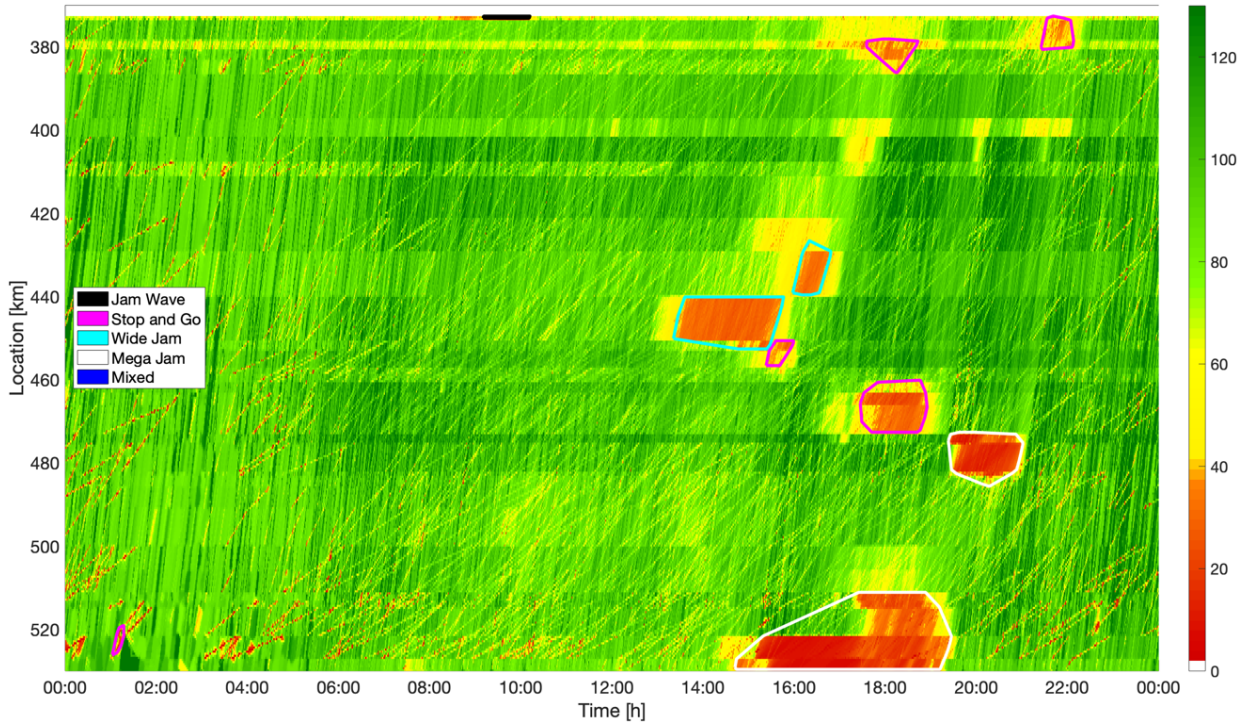


Abbildung 26 Stautypen aus Bluetooth-Daten vom 29.05.2019 in FR Nürnberg (in km/h)

### 5.1.5 Fusionierte Geschwindigkeitsdaten

In der fusionierten Darstellung werden zehn Staumuster erkannt, 1x Stauwelle (schwarz), 6x Stop&Go (violett), 1x Breiter Stau (türkis), 2x Mega-Stau (weiß) (Abbildung 27). Im Bereich der nicht vorhandenen Überkopfsensorik-Detektion basiert die Geschwindigkeitsverteilung auf FCD und Bluetooth-Erfassung, so dass dort die erkannten Stauungen schwerpunktmäßig Stop&Go-Verkehr darstellen.

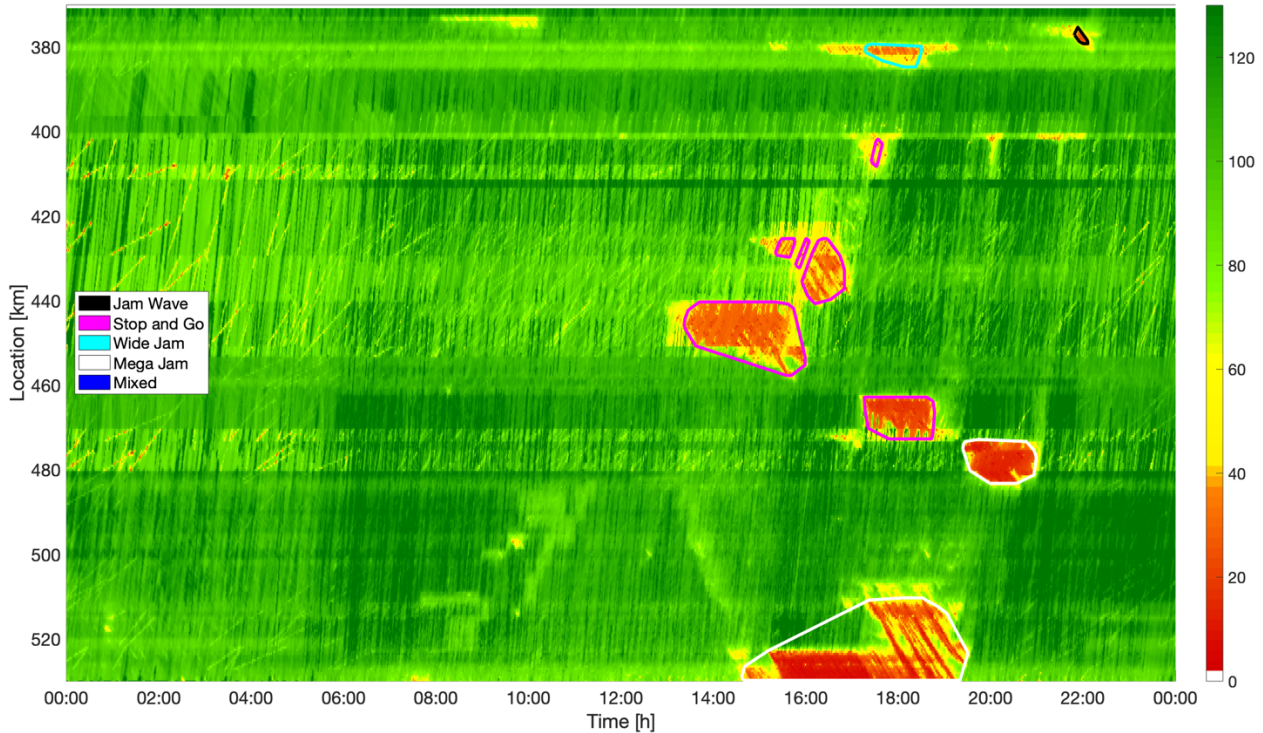


Abbildung 27 Stautypen aus fusionierten Geschwindigkeitsdaten vom 29.05.2019 in FR Nürnberg (in km/h)

Die folgende Abbildung 28 zeigt die identifizierten Cluster je Datenquelle (SDD: lokale Verkehrserfassung, BT: streckenbezogene Verkehrserfassung, FCD: mobile Verkehrserfassung) und für die Fusion, ohne die zugrunde liegenden Geschwindigkeiten.

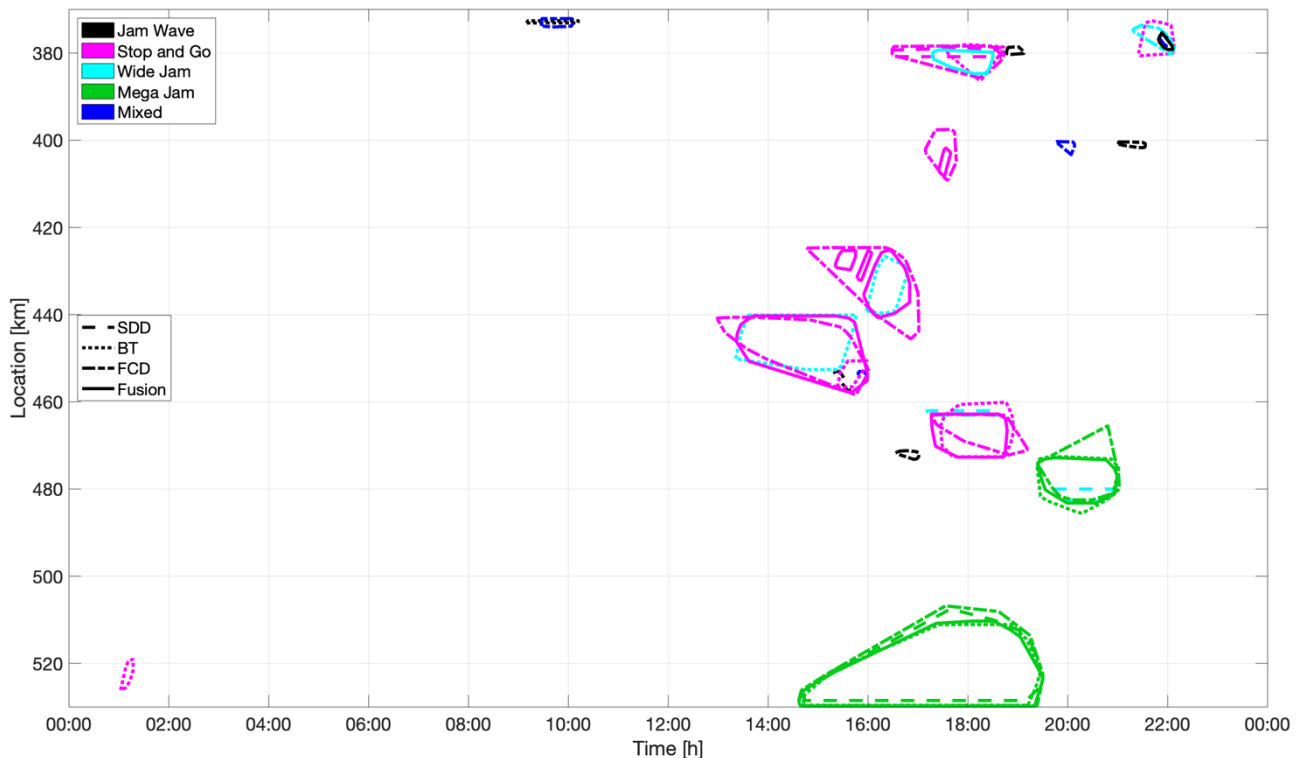


Abbildung 28 Identifizierte Stautypencluster vom 29.05.2019 in FR Nürnberg

## 5.2 Stauschwerpunktanalyse

Basierend auf der Stautypen-Klassifikation einzelner Stauereignisse wurde eine Stautypen-Häufigkeitsanalyse zur Identifikation von Stauschwerpunkten implementiert (siehe insbesondere [5]). Für jedes Cluster wird dabei ein eindeutiger Stautyp ermittelt und der Startzeitpunkt und der Startort der Stauung berechnet. Somit kann eine zeitliche, eine räumliche und eine zeitlich-räumliche Verteilung der Staubeginne dargestellt werden.

Dabei werden Daten des gesamten Abschnitts zwischen München und Nürnberg betrachtet, d.h. 90 km von lokaler Detektion und jeweils 160 km von mobiler und streckenbezogener Detektion. Zeitlich gehen von lokaler Detektion 150 Tage, von mobiler Detektion 45 Tage und von streckenbezogener Detektion 60 Tage ein, vgl. auch Tabelle 3.

### 5.2.1 Daten aus lokaler Verkehrserfassung

Die folgenden Abbildungen zeigen die Verteilung der Stauereignisse basierend auf lokaler Verkehrsdatenerfassung. In FR München wurden insgesamt 835 Stacluster detektiert, davon 41% Stauwelle, 35% Stop&Go-Verkehr, 16% Breiter Stau und 1% Mega-Stau. 7% der Stacluster konnten durch den Algorithmus nicht eindeutig einem Stautyp zugeordnet werden, daher werden sie dem Stautyp „Mixed“ zugewiesen. In FR Nürnberg wurden 603 Staus identifiziert, davon 35% Stauwelle, 34% Stop&Go-Verkehr, 20% Breiter Stau und 1% Mega-Stau. „Mixed“ wurde in 10% der Fälle ausgewählt.

Abbildung 29 zeigt die zeitliche Verteilung der Staubeginne je Stautyp in FR München, zur besseren Visualisierung aggregiert zu Intervallen von 30 min. Deutlich erkennbar sind zwei Peaks der Stauanzahl in den Morgen- bzw. Nachmittagsstunden, insbesondere beeinflusst durch auftretenden Stop&Go-Verkehr zwischen 6:00 und 8:00 Uhr. Dies entspricht der üblichen Verkehrsbelastung dieser Autobahn. Breiter Stau verteilt sich gleichmäßig über den ganzen Tag, mit einer deutlicheren

Ausprägung zwischen 9:00 und 11:00 Uhr sowie zwischen 16:00 und 18:00 Uhr zu den hochbelasteten Zeiten.

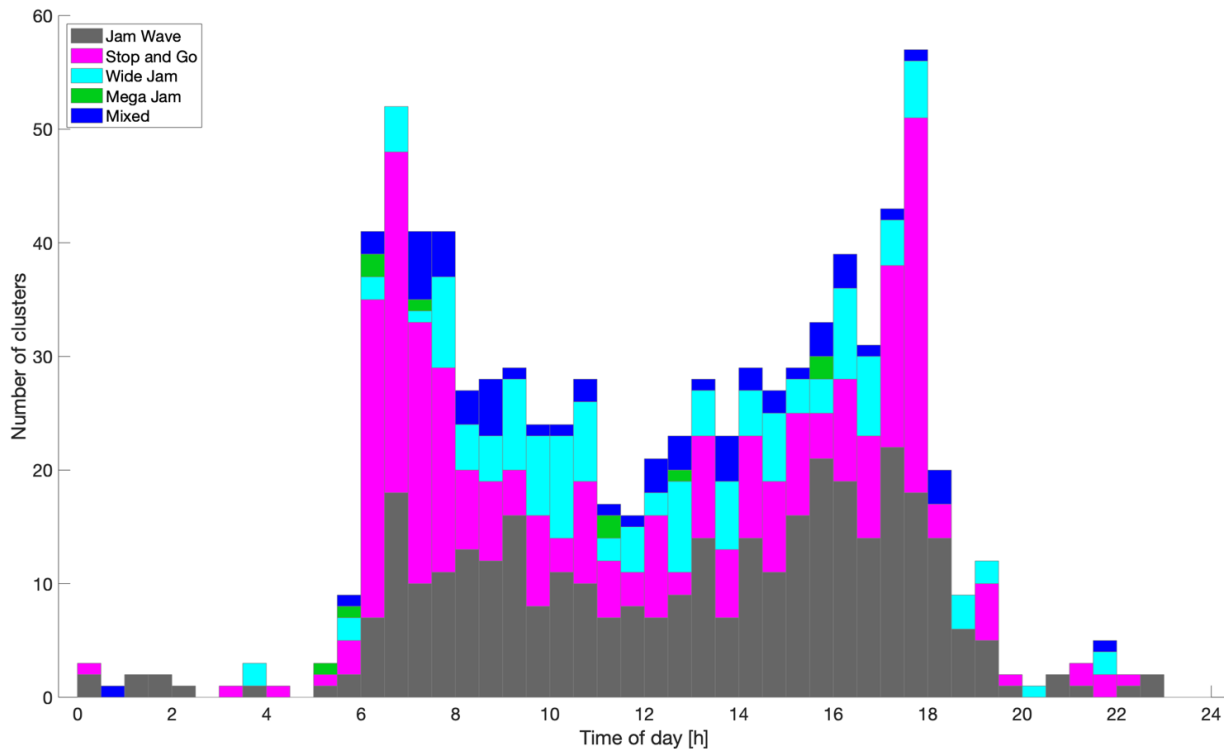


Abbildung 29 Zeitliche Stauverteilung aus lokaler Detektion in FR München

Abbildung 30 zeigt analog die Verteilung der Staus in FR Nürnberg. Deutlich zu erkennen ist die fehlende Morgenspitze, einhergehend mit grundsätzlich später beginnenden Staus. Mittags und nachmittags dominieren die Stautypen Stauwelle und Stop&Go, Breiter Stau tritt gleichverteilt über den Tag auf, insbesondere aber im späten Berufsverkehr ab 19 Uhr.

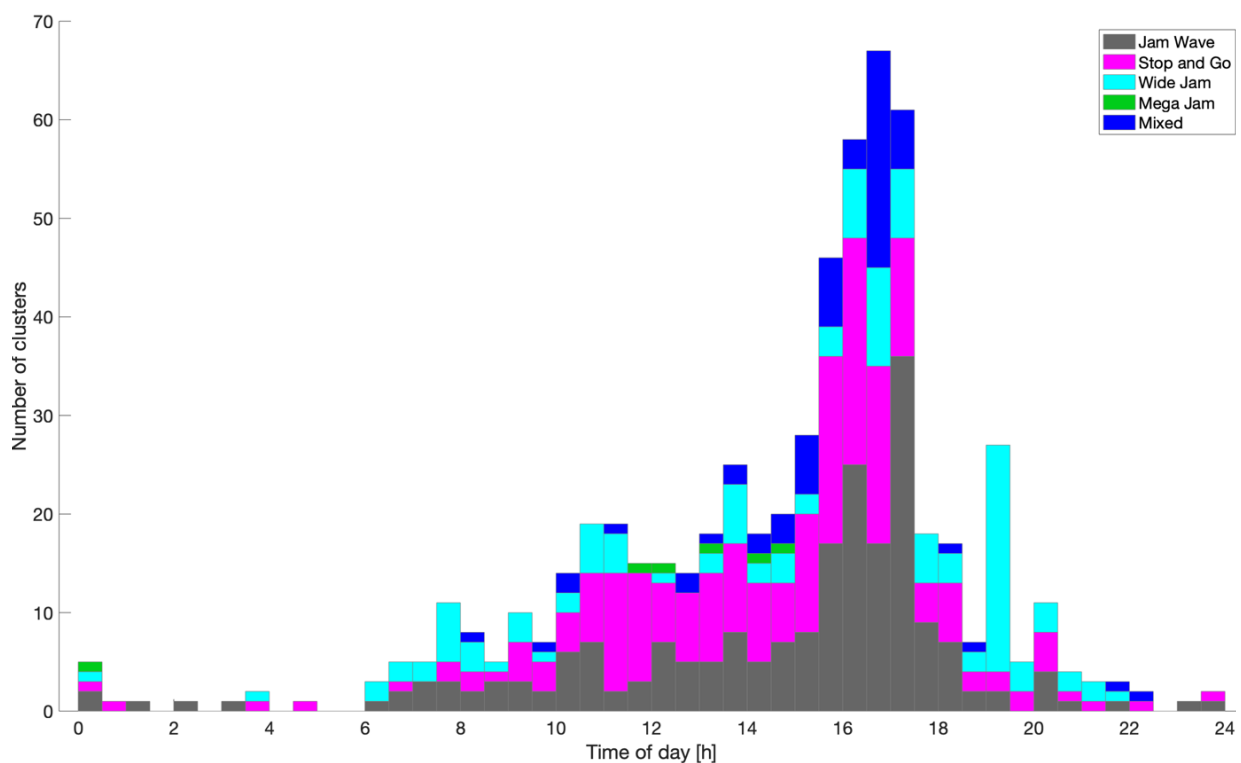


Abbildung 30 Zeitliche Stauverteilung aus lokaler Detektion in FR Nürnberg

Die räumliche Stauanalyse in FR München ist in Abbildung 31 zu sehen. Zwischen km 400 und km 450 sowie zwischen km 475 und km 480 ist keine lokale Verkehrsdatenerfassung installiert, daher ist dieser Bereich ohne Staus markiert. Die Staubeginne wurden für die Darstellung aggregiert zu Intervallen von 2 km. Stromaufwärts von Autobahnkreuzen tritt häufig Stau auf, insbesondere vor der Ausfahrt zur A99 (Stop&Go-Verkehr durch Rückstaubildung wegen einer Arbeitsstelle auf der A99) sowie am Autobahnende am Übergang zum Mittleren Ring in München.

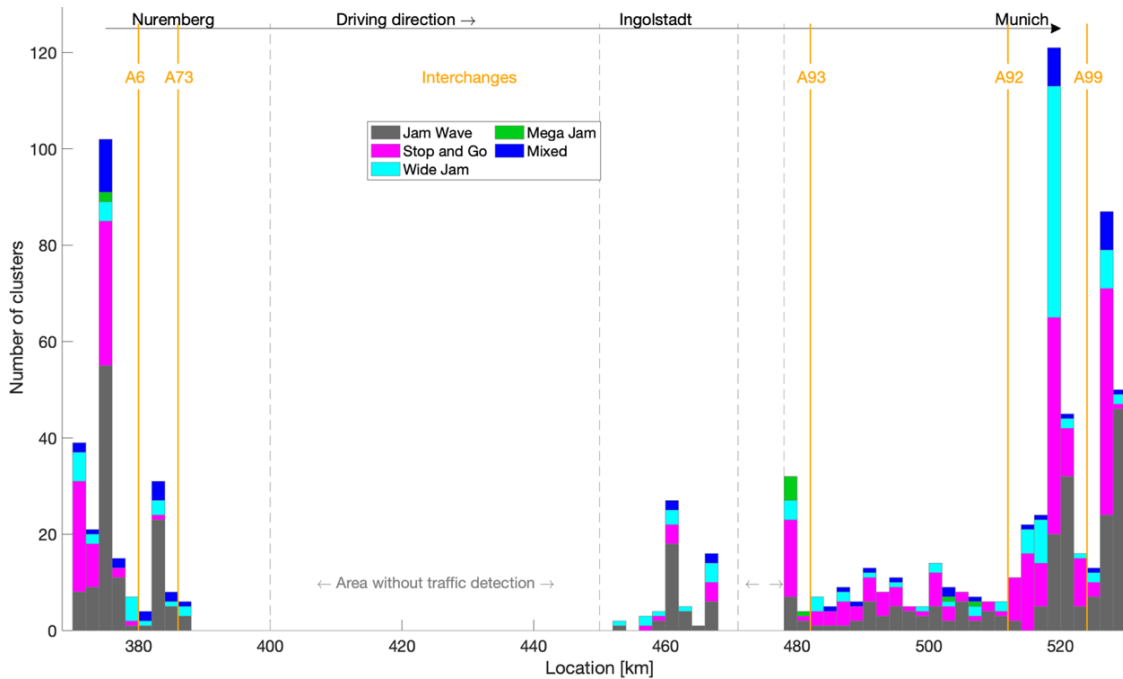


Abbildung 31 Räumliche Stauverteilung aus lokaler Detektion in FR München

In der Gegenrichtung zeigt die räumliche Stauschwerpunktanalyse (Abbildung 32) ebenfalls ein vermehrtes Auftreten von Stau stromaufwärts von Ausfahrten bzw. Autobahnkreuzen (A99, A73). Auffällig ist hierbei insbesondere der hohe Anteil von Stop&Go-Verkehr im Verdichtungsraum Nürnberg sowie zahlreiche Stauwellen zu Beginn der Autobahn zwischen Mittlerem Ring in München und der Anschlussstelle zur A99.

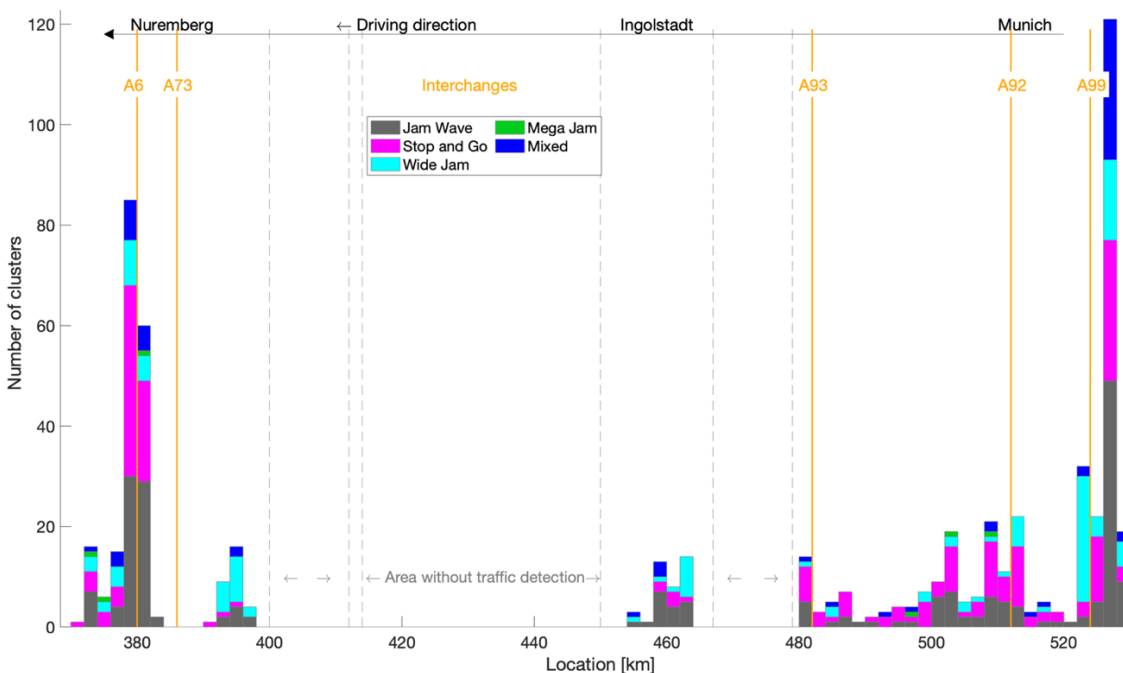


Abbildung 32 Räumliche Stauverteilung aus lokaler Detektion in FR Nürnberg

Abbildung 33 zeigt die zeitlich-räumliche Verteilung der Staus in FR München. Die Symbolgröße für die jeweiligen Stautypen sind skaliert mit der Fläche der Stauereignisse. Kleine schwarze Kreise bedeuten beispielsweise eine Stauwelle mit kleiner raum-zeitlicher Ausdehnung, wohingegen größere Kreise für eine größere Fläche der konvexen Hülle stehen. Zwischen 6:00 und 8:00 Uhr überwiegt der Anteil an Stop&Go-Verkehr zwischen km 510 und km 529. Stauwellen treten örtlich begrenzt, aber während des ganzen Tages auf. Die Seitenradar-Erfassung zwischen km 450 und km 469 detektiert hauptsächlich Stauwellen. Stauungen, die am Ende der Seitenradar-Erfassung auftreten, haben ihren Ursprung meist südlicher, im nichtdetektierten Bereich. Hier ist die Betrachtung von räumlich durchgehender Erfassung wie der mobilen oder der streckenbezogenen, aber auch von fusionierten Verkehrsdaten zielführender.

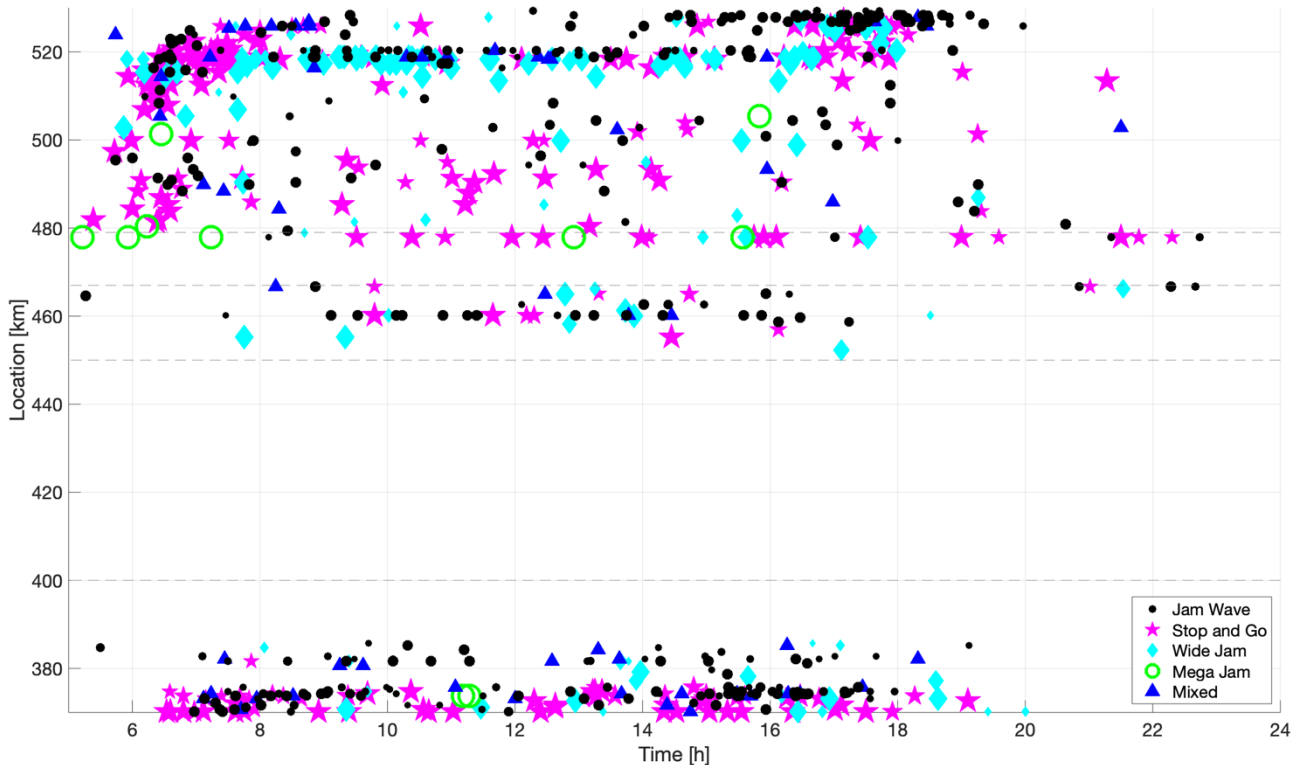


Abbildung 33 Zeitlich-räumliche Stauverteilung aus lokaler Detektion in FR München

Analog zeigt Abbildung 34 die zeitlich-räumliche Verteilung in FR Nürnberg. Interessant sind hier die Stop&Go-Verkehre vor der Ausfahrt zur A73 zwischen 8 und 17 Uhr. Im Verdichtungsraum München ist der Schwerpunkt an Stop&Go-Verkehr zwischen der Einfahrt von der A99 bis zur Ausfahrt zur A92, allerdings begrenzt auf die Nachmittagsstunden. Stauwellen treten gehäuft vor der Ausfahrt zur A99 auf, ebenfalls erst nachmittags. Die weiteren Stauwellen treten zwischen den Ausfahrten der A92 und der A93 auf, ohne einen Schwerpunkt weder zeitlich noch räumlich zu bilden. Die Seitenradar-Erfassung detektiert in den betrachteten 150 Tagen lediglich einige wenige Stauereignisse, dieser Bereich ist demnach nicht störungsauffällig.



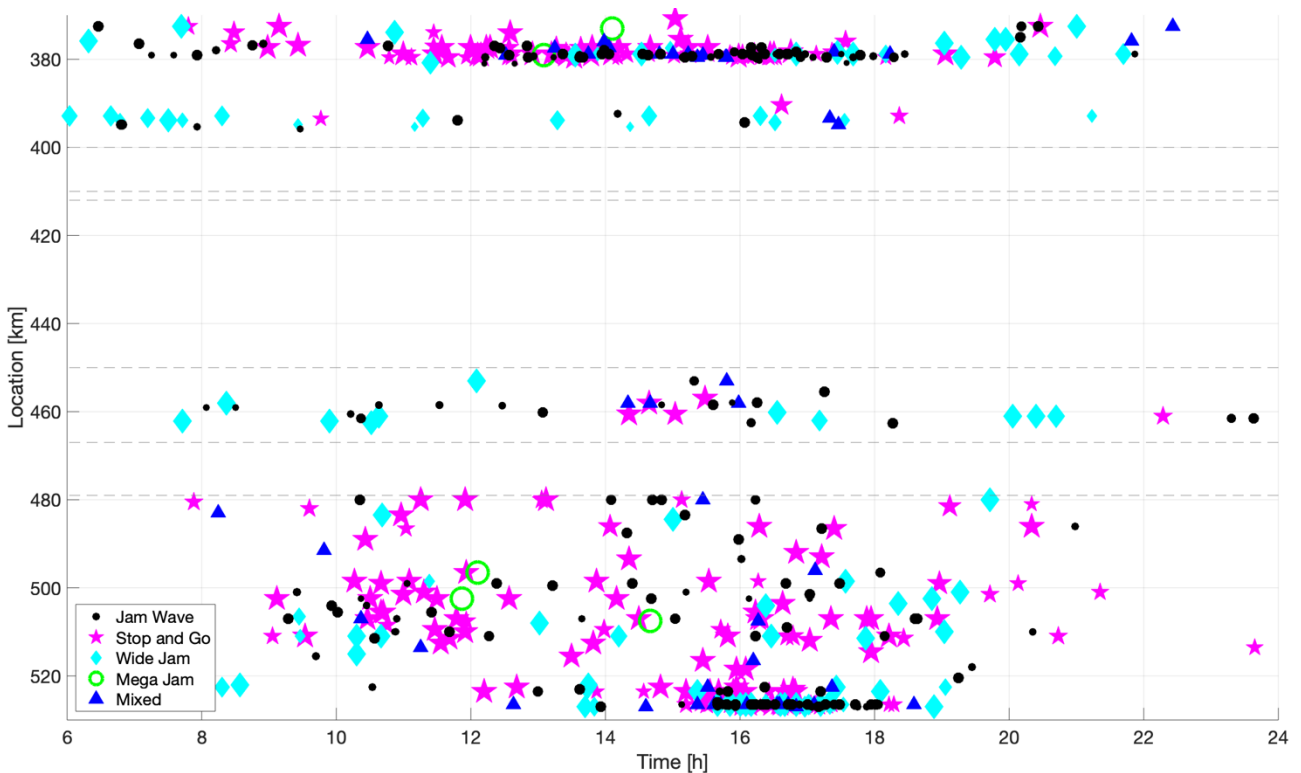


Abbildung 34 Zeitlich-räumliche Stauverteilung aus lokaler Detektion in FR Nürnberg

### 5.2.2 Daten aus mobiler Verkehrserfassung

Die Stauschwerpunktanalyse für FCD wurde auf Basis von 41 Tagen in FR Nürnberg und 45 Tagen in FR München aus den Monaten April, Mai, November und Dezember 2019 durchgeführt. In FR München wurden 271 Staus erkannt, davon 23% Stauwelle, 58% Stop&Go, 7% Breiter Stau, 3% Mega-Stau und 9% unbestimmter Stautyp „Mixed“. In der Gegenrichtung wurden 133 Störfälle detektiert, davon 14% Stauwelle, 58% Stop&Go, 12% Breiter Stau, 7% Mega-Stau und 9% Mixed.

Der Anteil Stop&Go ist im Vergleich zur lokalen Erfassung höher, da die Geschwindigkeitsdarstellung auf realen Trajektorien beruht. Mega-Stau wird häufiger erkannt als durch Überkopfsensorik, da das Erfassungsgebiet deutlich größer ist. Erfasste Mega-Staus sind hauptsächlich im nicht durch Überkopfsensorik-Erfassung ausgestatteten Gebiet.

Folgende Abbildungen stellen analog zur lokalen Verkehrsdatenerfassung die zeitlichen, die räumlichen sowie die zeitlich-räumlichen Stautypenhäufungspunkte je Fahrtrichtung dar.

Abbildung 35 zeigt die zeitliche Verteilung aufgetretener Staumuster je Stautyp in FR München. Auffällig ist der hohe Anteil an Stop&Go-Verkehr, aufgeteilt in eine Morgen- und eine Nachmittagsspitze. Stauwellen und Breiter Stau treten am Vormittag kaum, am Nachmittag gehäuft auf.

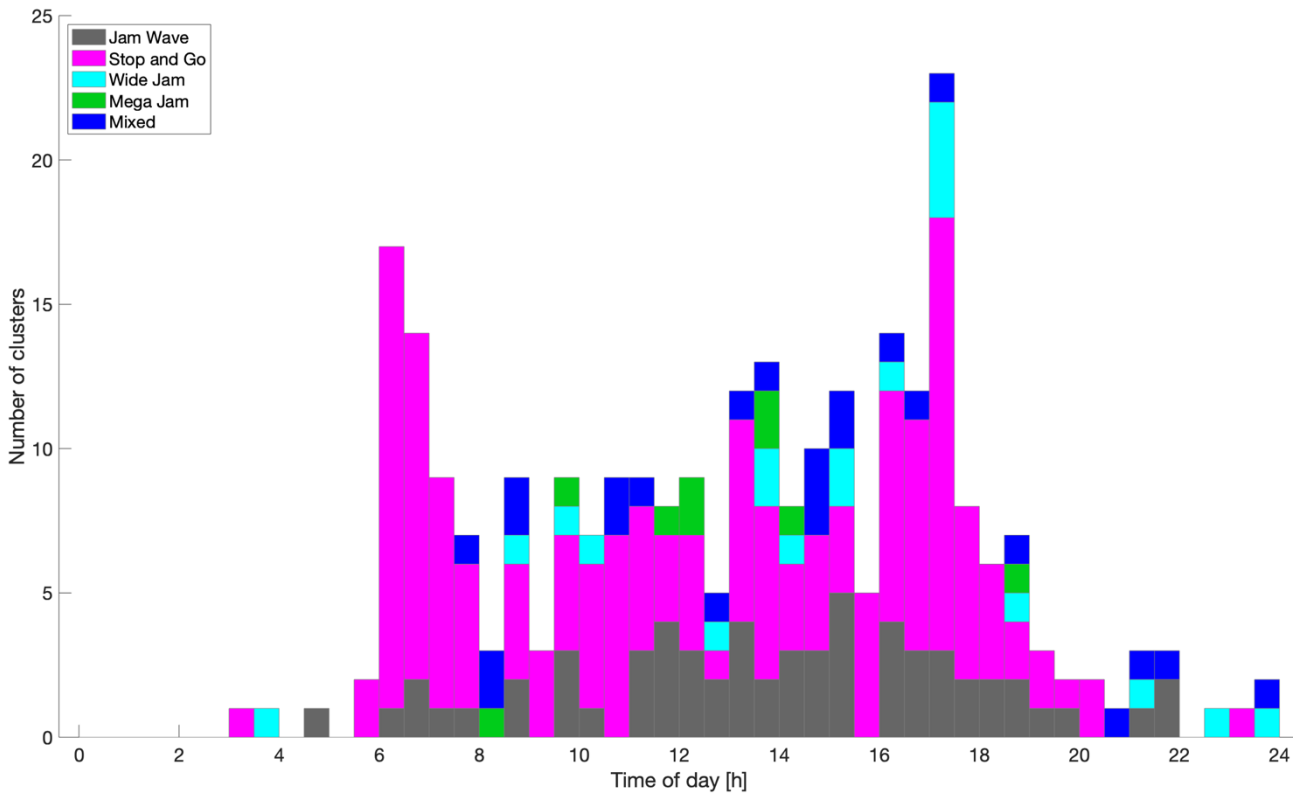


Abbildung 35 Zeitliche Stauverteilung aus mobiler Detektion in FR München

In der Gegenrichtung (Abbildung 36) dominieren ebenfalls Stop&Go-Muster, wobei die Morgenspitze zeitlich nach hinten verlagert auftritt. Die Nachmittagsspitze beginnt mit einer erhöhten Stauwahrscheinlichkeit ab 14 Uhr. Breiter Stau tritt über den ganzen Tag verteilt auf, Stauwellen hingegen hauptsächlich am Nachmittag und Abend.

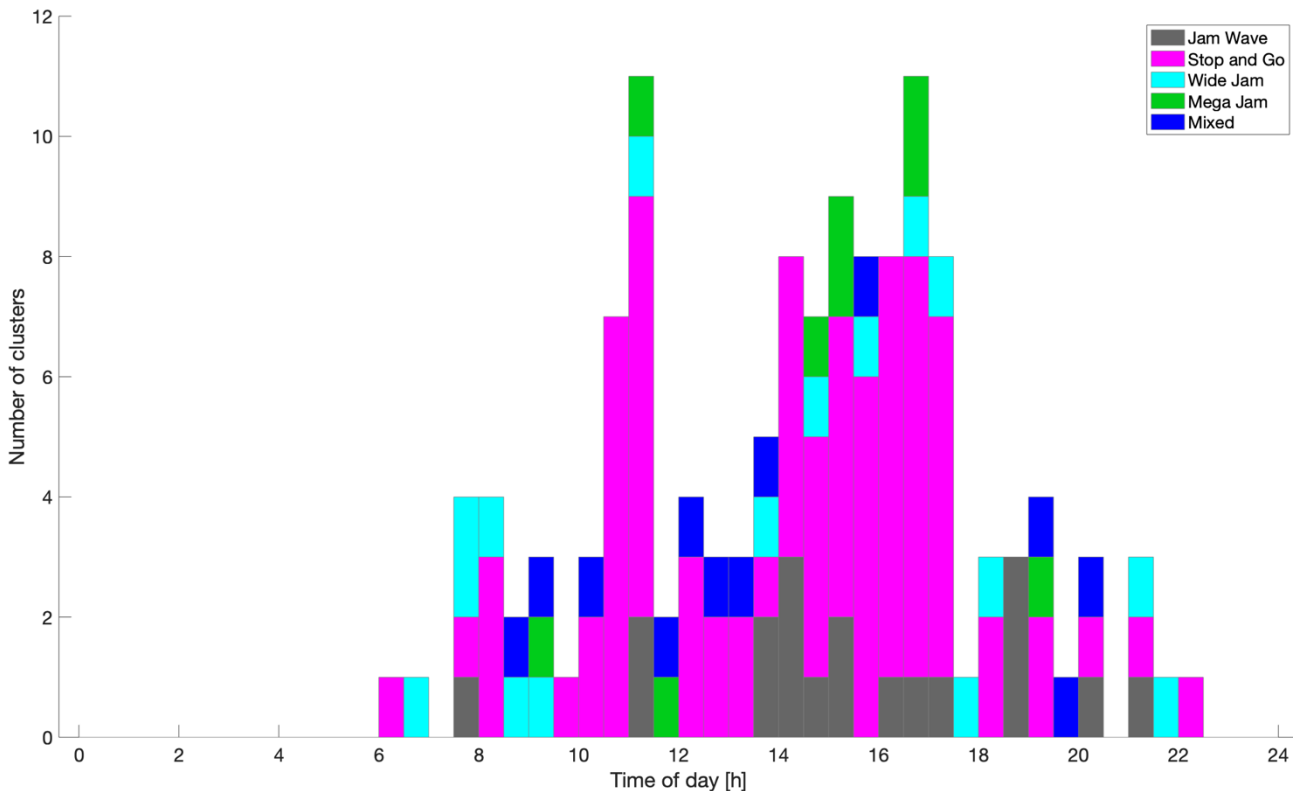


Abbildung 36 Zeitliche Stauverteilung aus mobiler Detektion in FR Nürnberg

Die räumliche Schwerpunktanalyse ergibt in FR München (Abbildung 37) wiederum Häufungspunkte für Stop&Go vor Anschlussstellen und Autobahnkreuzen. Insbesondere im Verdichtungsraum München werden Störfälle vor der A93, der A99 und dem Mittleren Ring in München beobachtet.

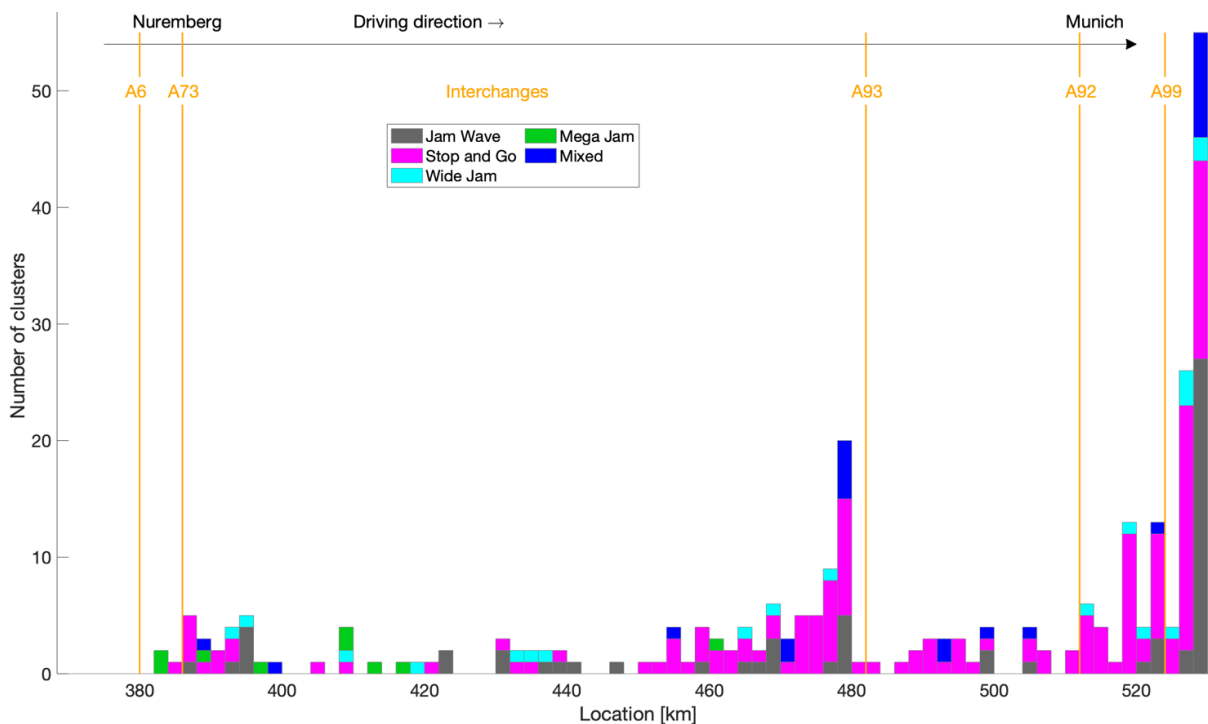


Abbildung 37 Räumliche Stauverteilung aus mobiler Detektion in FR München

In FR Nürnberg (Abbildung 38) sind die Stop&Go-Vorkommen auf wenige Orte verteilt, hier insbesondere nach Einfahrten an Anschlussstellen und Autobahnkreuzen. Dies liegt am einfahrenden Verkehr, aber auch daran, dass je identifiziertem Staucluster jeweils der stromabwärtige Startpunkt als Auslöser des Staus betrachtet wird. Ein Rückstau über den Knotenpunkt hinweg wird damit stromabwärts beobachtet.

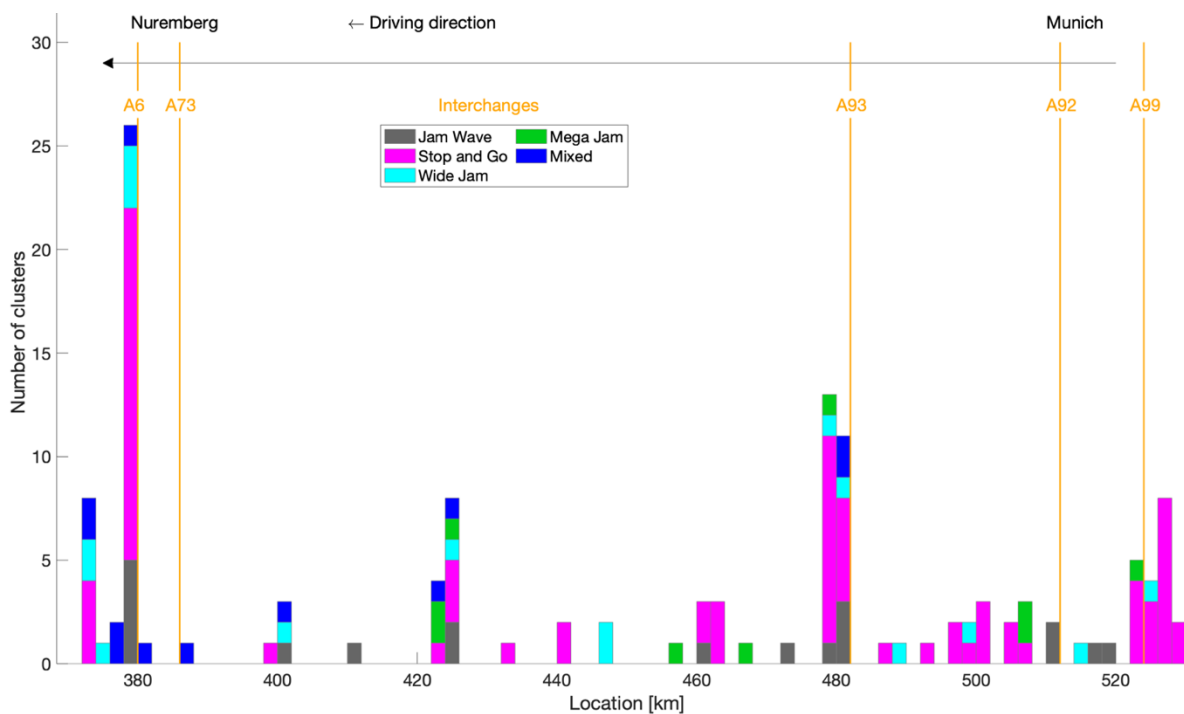


Abbildung 38 Räumliche Stauverteilung aus mobiler Detektion in FR Nürnberg

Die zeitlich-räumliche Analyse der FCD ergibt in FR München (Abbildung 39) analog zur lokalen Erfassung Häufungen von Stauwellen im Verdichtungsraum München, jedoch weniger Stauwellen in den Verdichtungsräumen Nürnberg und Ingolstadt. Breiter tritt ohne besondere Häufung auf. Mega-Stau wird hauptsächlich im Raum Nürnberg registriert. Stop&Go tritt in den Verdichtungsräumen auf, außerhalb davon, insbesondere zwischen Nürnberg und Ingolstadt, seltener. Analog zur lokalen Erfassung ist auch bei der mobilen Erfassung ein Stop&Go-Hot Spot in den Morgenstunden vor der Ausfahrt zur A99.

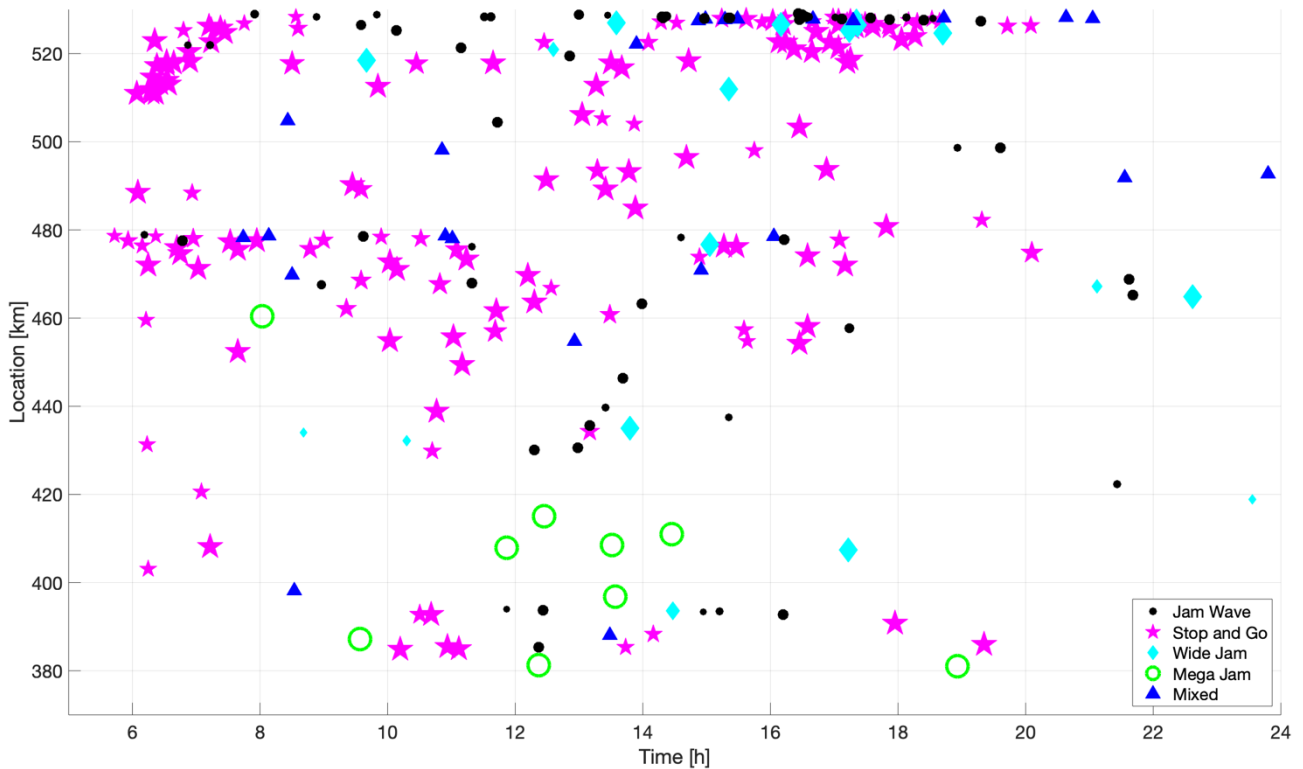


Abbildung 39 Zeitlich-räumliche Stauverteilung aus mobiler Detektion in FR München

Die Gegenrichtung (Abbildung 40) zeigt eine Häufung von Stop&Go im Verdichtungsraum Nürnberg während des ganzen Tages. Breiter Stau und Mega-Stau treten eher in den Verdichtungsräumen München und Ingolstadt auf, ohne zeitliche Konzentration. Stauwellen werden immer wieder zeitlich und räumlich detektiert.

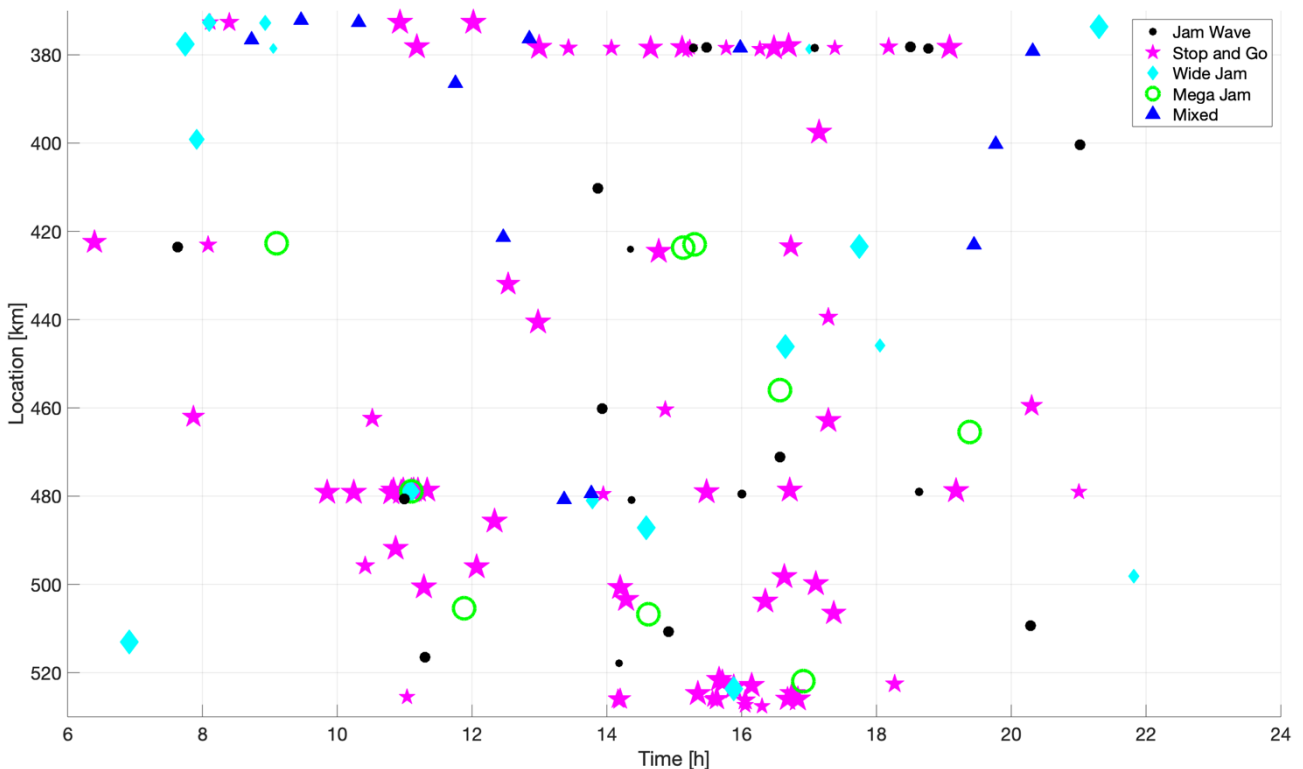


Abbildung 40 Zeitlich-räumliche Stauverteilung aus mobiler Detektion in FR Nürnberg

### 5.2.3 Daten aus streckenbezogener Erfassung

Als dritte Erfassungstechnologie werden auch die Bluetooth-Reisezeiten gegenübergestellt. Die folgenden Abbildungen zeigen die gemessenen und mit dem vorgestellten Interpolationsalgorithmus geglätteten Daten aus den Monaten April und Mai 2019 von insgesamt 60 Tagen. Grundsätzlich werden durch Reisezeitmessungen mehr Staucluster in den Nachtstunden erkannt. Dies liegt daran, dass bei niedrigem Verkehrsfluss einzelne Ausreißer, wie beispielsweise ein Stopp auf einem Parkplatz oder eine Lkw-Lenkpause, mit einer langen Segmentreisezeit, größeren Einfluss auf die gemittelten Geschwindigkeiten haben. Bei höherem Verkehrsfluss und der damit verbundenen größeren Datenbasis pro Segment und Zeitschritt werden diese Ausreißer stärker gemittelt und erhalten damit ein deutlich geringeres Gewicht in der Geschwindigkeitsberechnung. Da diese Ausreißer methodisch bedingt auftreten, werden in den nachfolgenden Abbildungen die Nachtstunden (22 bis 6 Uhr) nicht diskutiert.

Weiterhin ist der hohe Anteil Stop&Go erkennbar. Dies liegt daran, dass mehrere Einzelcluster zusammengefasst werden, zwischen denen Phasen freien Verkehrs liegen. Für die Verkehrslagererkennung nur basierend auf Bluetooth-Daten ist hierzu der Filter zur Störfallerkennung zunächst anzupassen, so dass singuläre Ereignisse besser voneinander abgegrenzt werden können. Die Gesamtstatistiken (Kapitel 5.2.4) sind ohne diese – vermeintlichen – Stauereignisse insbesondere nachts dargestellt.

In allen Abbildungen ist der Anteil detektierter Stauwellen sehr niedrig. Bluetooth-Messungen sind aufgrund der Messmethodik weniger gut geeignet, Stauwellen zu detektieren. Die Stauausbreitung erfolgt gegen die Fahrtrichtung, die streckenbezogene Erfassung in Fahrtrichtung. Dies ist eine wesentliche Erkenntnis dieser Studie.

Abbildung 41 zeigt die zeitliche Verteilung in FR München. Ausgeprägt sind hier die Morgen- und Abendspitzen, bedingt durch Stop&Go, aber auch Breiten Stau. Stop&Go wird häufig detektiert, Stauwellen kaum. Mega-Stau tritt gleichmäßig über den Tag verteilt auf, ohne Stauschwerpunkte zu bilden.

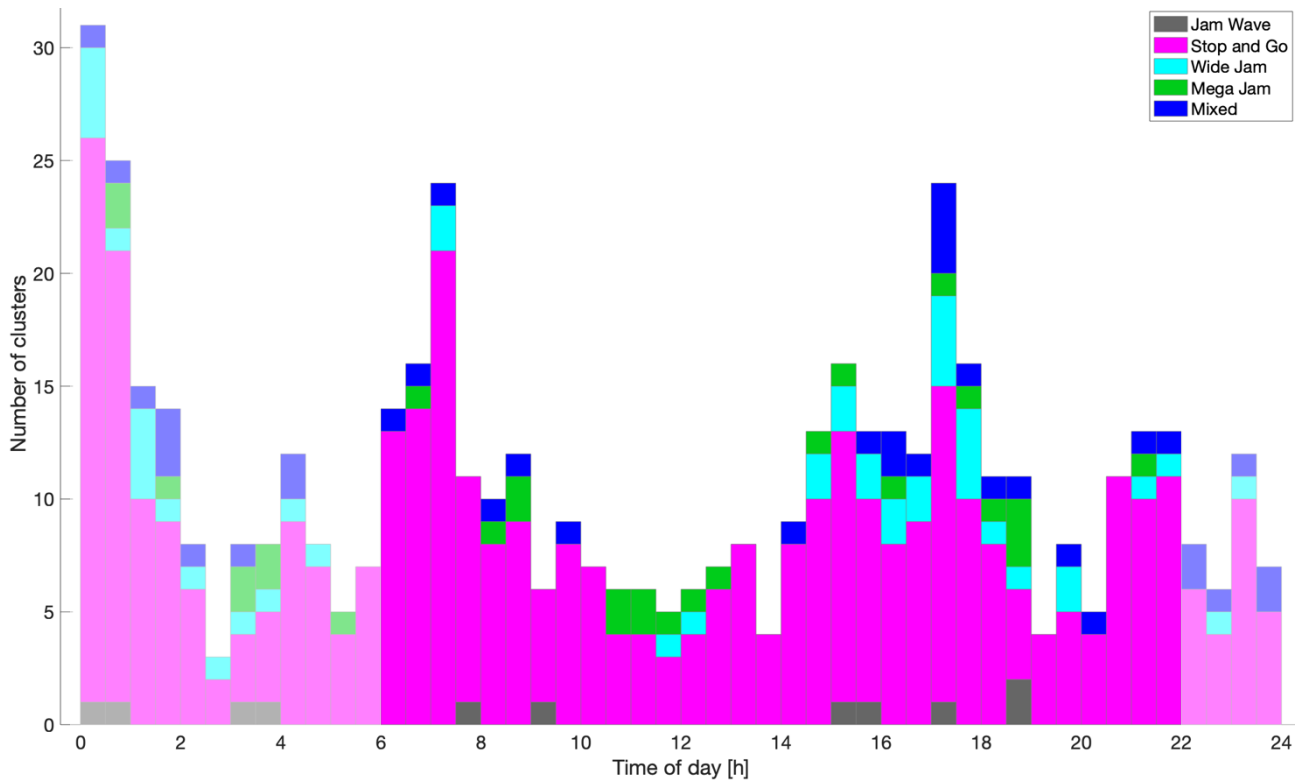


Abbildung 41 Zeitliche Stauverteilung aus streckenbezogener Detektion in FR München

In der Gegenrichtung (Abbildung 42) ist die Abendspitze deutlich zu erkennen, insbesondere durch den hohen Anteil Stop&Go sowie Breiten Stau. Auch hier überwiegt wieder der Anteil an Stop&Go; Stauwellen treten kaum auf. Mega-Stau tritt über den ganzen Tag verteilt auf.

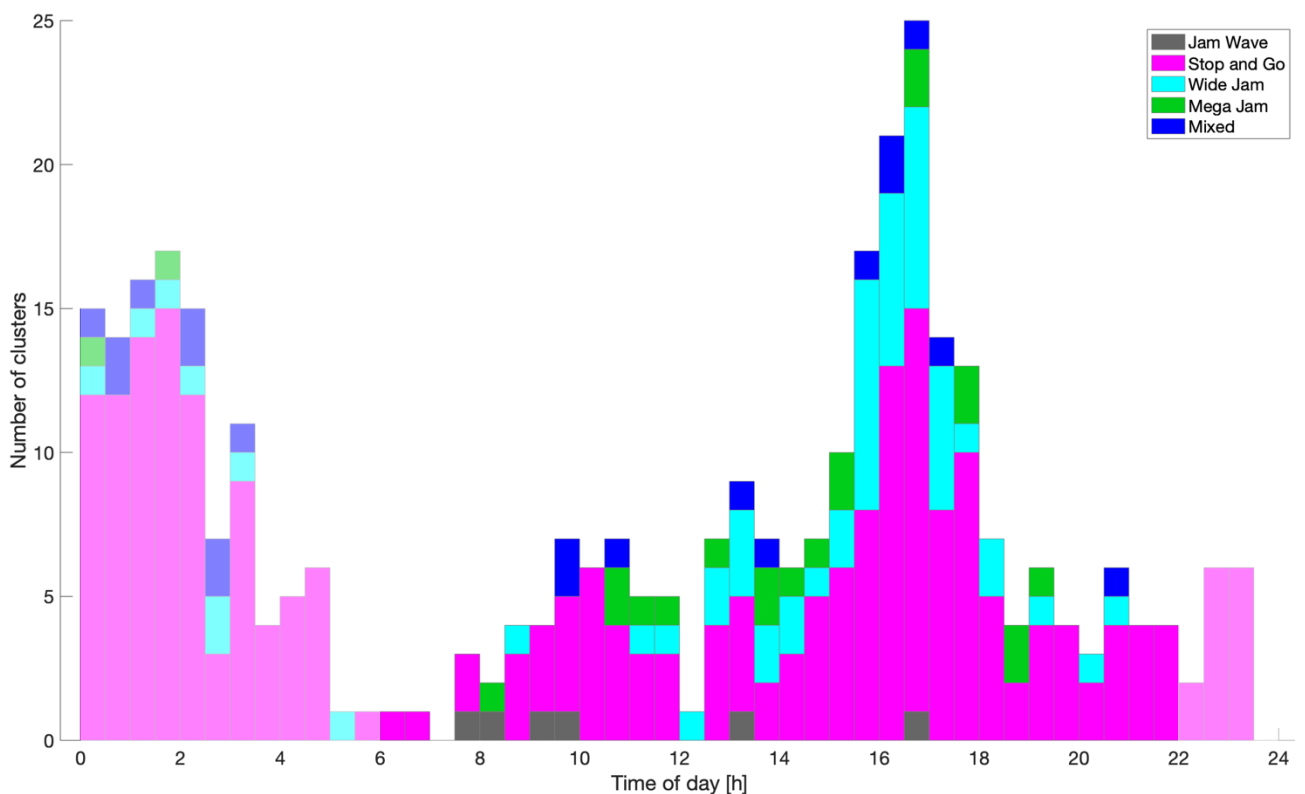


Abbildung 42 Zeitliche Stauverteilung aus streckenbezogener Detektion in FR Nürnberg

Die räumliche Häufung der Stauereignisse ist in Abbildung 43 dargestellt. Deutlich zu erkennen ist ein hoher Anteil Stop&Go-Verkehr im Verdichtungsraum München, insbesondere an den Anschlussstellen zur A92 und zur A99. Eine Hauptursache ist der Rückstau der A99 (Arbeitsstelle), so dass durch die nicht fahrstreifenfein vorliegenden Reisezeitmessungen die dreistreifige Hauptfahrbahn und die beiden ausfahrenden Fahrstreifen nicht voneinander getrennt werden können. Durch die zeitlich unterschiedliche Gewichtung der Staugeschwindigkeiten und der freien Verkehrsgeschwindigkeiten entstehen Schwankungen um die Staugrenzgeschwindigkeit, so dass hier oft Stop&Go-Verkehr erkannt wird, statt einem tatsächlichen Fahrstreifenstau (fahrstreifenweise unterschiedliche Stauausbreitung). Auch Stauwellen, die durch die streckenbezogene Erfassung schlecht erkannt werden können, werden häufig als Stop&Go-Verkehr klassifiziert, so dass dieser Anteil höher ausfällt als bei den anderen Erfassungsarten.

Ein weiterer Grund für Stau an bzw. nach Anschlussstellen ist die räumliche Unschärfe der streckenbezogenen Erfassung. Ein Bluetooth-Scanner erfasst je nach Gerätetyp Bluetooth-Geräte im Umkreis von mehreren Hundert Metern. Durch die Gitterbildung (Datendiskretisierung) in einem Raster von 500 m und die aggregierte Darstellung in der Abbildung in Intervallen von 2 km erscheint der Stauschwerpunkt nach der Anschlussstelle, obwohl er tatsächlich an der Anschlussstelle liegt.

Bei den Auswertungen der lokalen Erfassung gibt es einen zusätzlichen Schwerpunkt vor der Ausfahrt zum Mittleren Ring in München. Die Reisezeiterfassung ist direkt am Autobahnende weniger stark ausgebaut als die Überkopf-Sensorik. Außerhalb der Verdichtungsräume werden in FR München wenige Störfälle detektiert, wobei in der Abbildung durch die zahlreichen Stauungen im Verdichtungsraum München die Skala der y-Achse weiter gefasst ist.

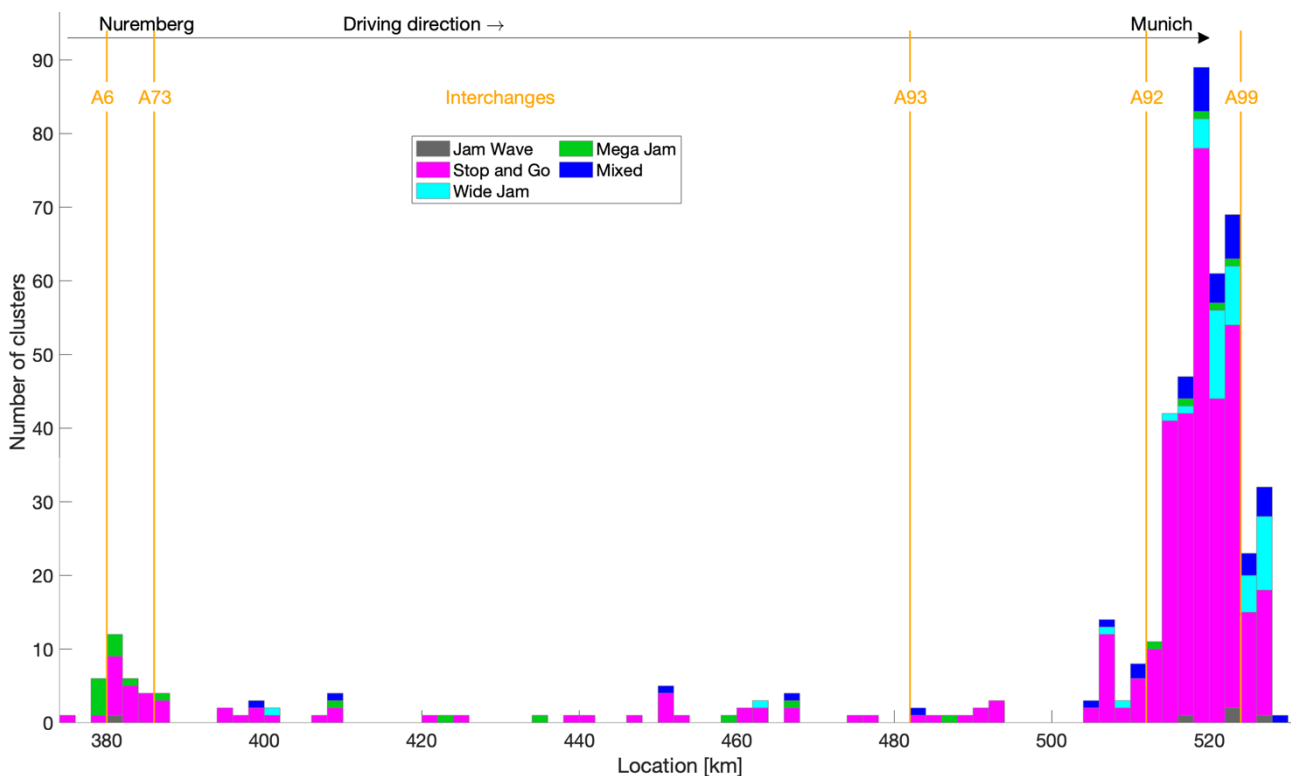


Abbildung 43 Räumliche Stauverteilung aus streckenbezogener Detektion in FR München

Abbildung 44 zeigt die Darstellung in FR Nürnberg. Die hochstörungsauffälligen Bereiche liegen auch hier wieder vor bzw. an den Anschlussstellen. Besonders der hohe Anteil Breiten Staus zwischen den Anschlussstellen A99 und A92 ist zu nennen. Auch in dieser Fahrtrichtung wird außerhalb der Verdichtungsräume mittels Reisezeitmessungen kaum Stau detektiert, bedingt durch eine relativ zu den Verdichtungsräumen kleinere Verkehrsstärke.

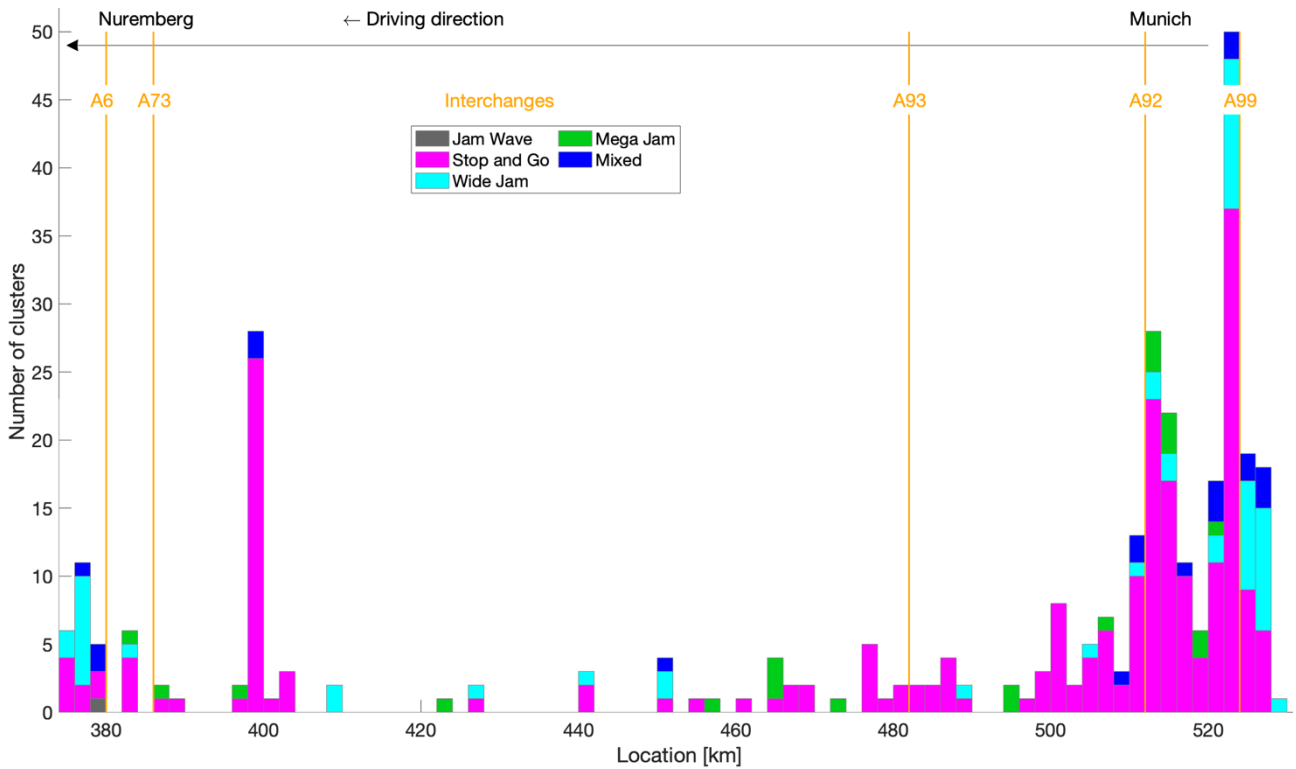


Abbildung 44 Räumliche Stauverteilung aus streckenbezogener Detektion in FR Nürnberg

In Abbildung 45 ist die zeitlich und räumlich kombinierte Darstellung der Bluetooth-Daten zu sehen. Neben den zahlreichen Stop&Go-Verkehren im Verdichtungsraum München sind keine weiteren Häufungen etwa im Verdichtungsraum Nürnberg erkennbar. Mega-Staus treten schwerpunktmäßig – wie auch schon die mobile Erfassung – im Raum Nürnberg auf, dabei über alle Zeiten verteilt. Breiter Stau wird eher im Verdichtungsraum München beobachtet. Insbesondere in diesen Bereichen sollte die Autobahn mit Bluetooth ausgestattet sein, da die Bluetooth-Technologie für die Erkennung großer zusammenhängender Stauungen gut geeignet ist.



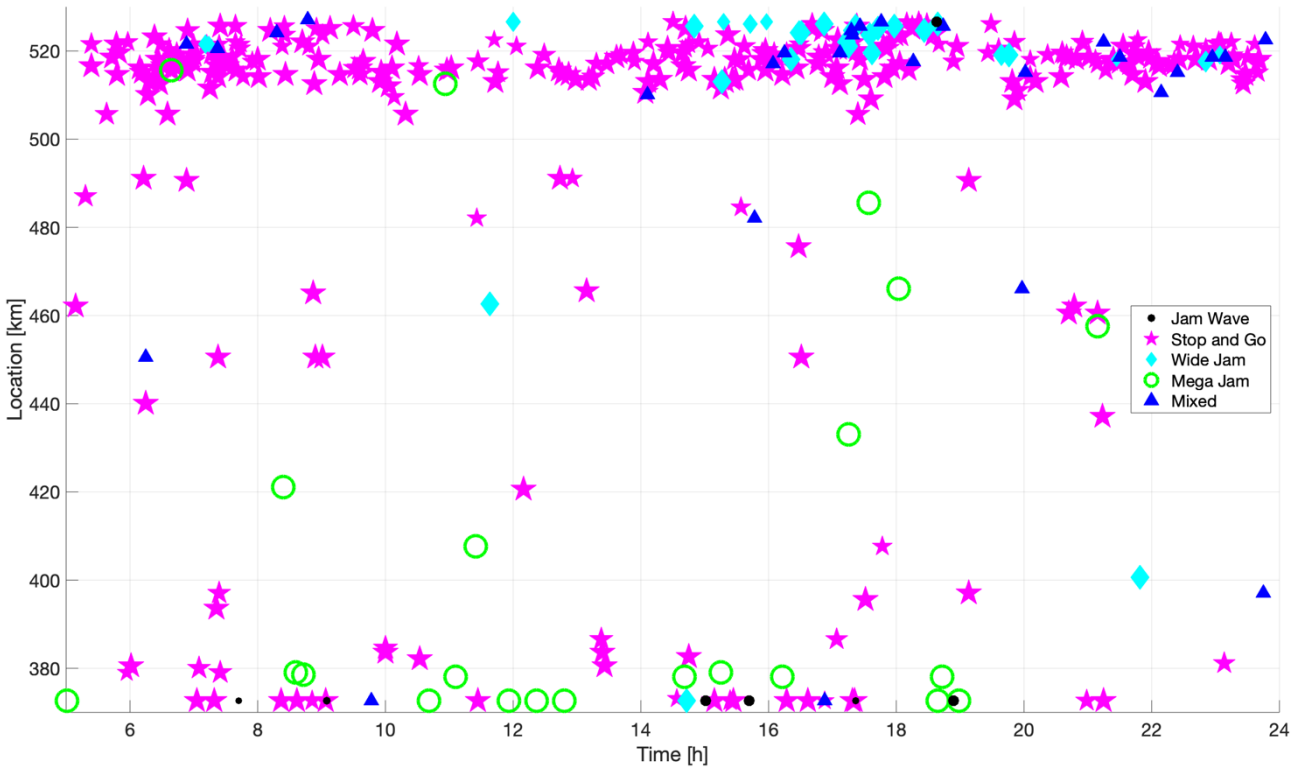


Abbildung 45 Zeitlich-räumliche Stauverteilung aus streckenbezogener Detektion in FR München

In FR Nürnberg (Abbildung 46) konzentrieren sich die Stauereignisse Breiter Stau auf die Nachmittagsstunden im Verdichtungsraum München, weitere Vorkommen sind eher Einzelereignisse. Mega-Stau ist räumlich und zeitlich verteilt ohne besondere Schwerpunkte. Stop&Go tritt in den Verdichtungsräumen München und Nürnberg auf, wo auch lokale Verkehrsdatenerfassung installiert ist. Außerhalb von ausgestatteten Gebieten tritt Stop&Go-Verkehr kaum auf.

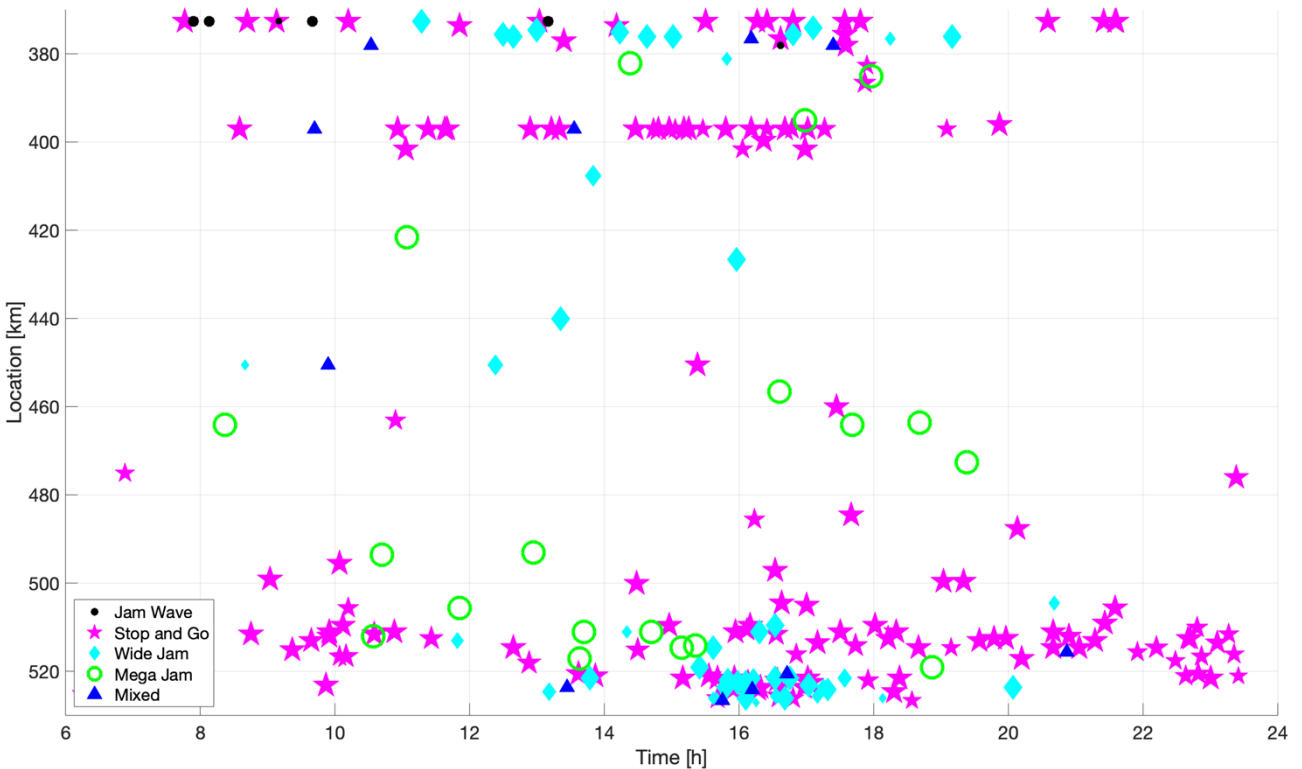


Abbildung 46 Zeitlich-räumliche Stauverteilung aus streckenbezogener Detektion in FR Nürnberg

### 5.2.4 Vergleich der Erfassungstechnologien

Aufgrund der fehlenden zeitlichen bzw. räumlichen Überschneidung der einzelnen Datenquellen für einen Zeitraum von mehreren Monaten werden die Datenquellen aus verschiedenen Zeiträumen miteinander verglichen. Dabei zeigt sich die nachfolgende Verteilung der Stautypen. Die Differenz zu 100% entspricht jeweils dem Stautyp „Mixed“, bei dem einem Stauereignis automatisiert kein eindeutiger Stautyp zugeordnet werden konnte.

Für die streckenbezogene Erfassung werden die Auswertungen zwischen 6 und 22 Uhr dargestellt. In den Nachtstunden werden 34% (FR München, entsprechend 177 Stauereignissen) bzw. 36% (FR Nürnberg, entsprechend 126 Stauereignissen) nicht betrachtet. Die prozentuale Verteilung auf die Stautypen ändert sich dadurch nur marginal.

FR München:		Stautypen			
Verkehrserfassungstechnologie	Anzahl erfasster Stauereignisse pro erfasstem Tag und pro 10 km Erfassungsgebiet	Stauwelle	Stop&Go	Breiter Stau	Mega-Stau
Lokal	835 Stauereignisse, 150 Tage, 90 km: 0,6	41%	35%	16%	1%
Mobil	271 Stauereignisse, 45 Tage, 160 km: 0,4	23%	58%	7%	3%
Streckenbezogen	343 Stauereignisse, 60 Tage, 160 km: 0,4	2%	77%	8%	6%

FR Nürnberg:		Stautypen			
Verkehrserfassungstechnologie	Anzahl erfasster Stauereignisse pro erfasstem Tag und pro 10 km Erfassungsgebiet	Stauwelle	Stop&Go	Breiter Stau	Mega-Stau
Lokal	603 Stauereignisse, 150 Tage, 90 km: 0,4	35%	34%	20%	1%
Mobil	133 Stauereignisse, 41 Tage, 160 km: 0,2	14%	58%	12%	7%
Streckenbezogen	220 Stauereignisse, 60 Tage, 160 km: 0,2	3%	62%	22%	9%

Die Anzahl erfasster Stauereignisse gibt ein Maß der Wahrscheinlichkeit eines Stauereignisses an einem Tag auf 10 km Erfassungsgebiet. Durch lokale Verkehrserfassung ist ein Stau wahrscheinlicher als durch mobile und streckenbezogene Erfassung. Das liegt daran, dass lokale Erfassung in den Verdichtungsräumen München, Ingolstadt und Nürnberg installiert ist, in denen häufiger Stau erkannt wird. Mobile und streckenbezogene Erfassung, die beide auf der gesamten betrachteten Strecke verfügbar sind, erkennen tagsüber mit der gleichen Wahrscheinlichkeit Stau, in beiden Fahrtrichtungen. Dies zeigt, dass die Parametrierung bei jeder der Erfassungstechnologien gut gewählt ist.

Ein Großteil der auftretenden Verkehrsstörungen sind Stauwellen und Stop&Go-Verkehr. Je nach Detektionstechnologie beträgt deren Anteil ca. 70 - 80% aller Stauungen.

Die Schwankungen der einzelnen Datenquellen untereinander sind stärker als die Schwankungen je Fahrtrichtung. FCD als kleinräumige Geschwindigkeitsdarstellung überschätzt Mega-Staus, während Stauwellen und Breiter Stau eher unterschätzt werden. Streckenbezogene Geschwindigkeitsdarstellungen sind gut geeignet, um Breiten Stau und Mega-Stau zu erkennen, für Stauwellen weniger. Stop&Go-Verkehr wird insbesondere durch lokale und mobile Erfassung gut erkannt, in der streckenbezogenen überschätzt. Die Schwankungen in der Erfassungshäufigkeit von Stop&Go liegen hauptsächlich am Streckenanteil der Ausstattung (Überkopfsensorik-Erfassung ist auf ca. 80 km installiert, Seitenradar auf weiteren ca. 10 km, wohingegen mobile und streckenbezogene Erfassung auf ca. 160 km Strecke verfügbar sind).

## 6 Ausstattungsempfehlungen und Kostenvergleich

Neben möglichen Fusionsmethoden untersucht der Artikel [8] weiterhin mögliche Ausstattungsvarianten hinsichtlich der bestmöglichen Geschwindigkeits- und Reisezeitrekonstruktion. Für jede Sensorkombination wird der jeweils beste (d.h. kleinste) IMAE- bzw. MAPE-Fehler der vier Fusionsansätze dargestellt (Abbildung 47 bzw. Abbildung 48). Hier zeigt sich die beste Geschwindigkeitsrekonstruktion durch lokale und mobile Ausstattung, die zweitbeste durch ausschließlich mobile Sensorik. Die beste Reisezeitrekonstruktion wird durch lokale und mobile Detektion erreicht, die zweitbeste durch die Fusionierung aller Datenquellen.

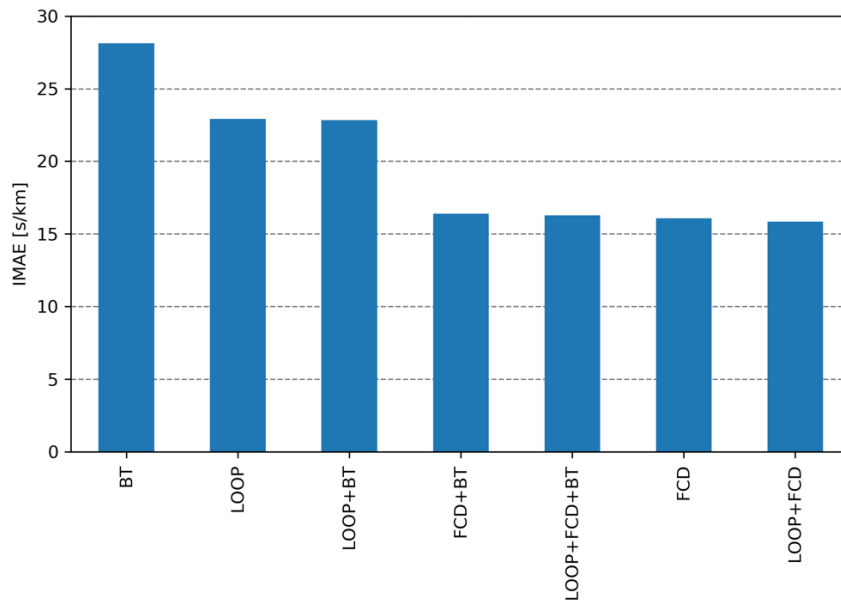


Abbildung 47 Kleinste IMAE-Fehler bzgl. verschiedener Ausstattungen als Maß für die Geschwindigkeitsrekonstruktion

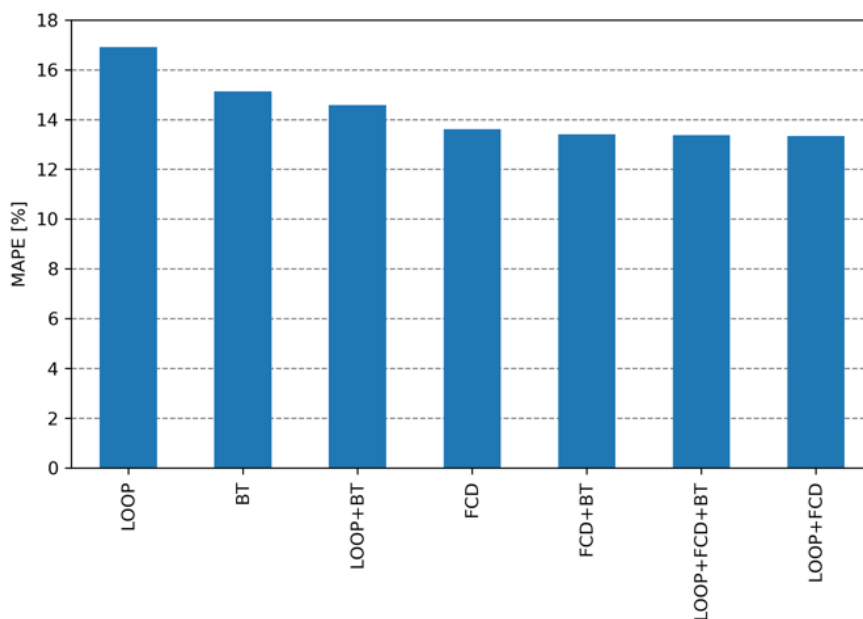


Abbildung 48 Kleinste MAPE-Fehler bzgl. verschiedener Ausstattungen als Maß für die Reisezeitrekonstruktion

## 6.1 Ausstattungsempfehlungen

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass alle Detektionstechnologien die Verkehrslage durch die Echtzeit-Detektion mit einem unterschiedlichen Detailgrad erfassen können. Die Grundvoraussetzung ist ein hinreichend kleiner Sensorabstand von wenigen Kilometern, so dass Stau detektiert werden kann. Abhängig vom Zweck der Ausstattung (etwa Verkehrsinformation oder Verkehrssteuerung) ist die Ausstattung differenziert zu wählen. Für Verkehrsinformationen ist eine weniger detailliertere Datengrundlage erforderlich. Um aber die Exaktheit der Erkennung einer Stauung zu erhöhen, ist die Betrachtung verschiedener Stautypen hilfreich. So sind beispielsweise auch kurzzeitige Prognosen über das Verkehrsgeschehen möglich.

Überkopfsensorik-Daten erkennen die identifizierten Stautypen zuverlässig und klassifizieren nachvollziehbar. Live-FCD erkennen eher Stop&Go-Verkehr als Stauwellen und sollten in Bereichen mit hohem Anteil von Stop&Go-Verkehr genutzt werden. Bluetooth-Daten sind in der aktuellen Ausstattungsvariante (durchschnittliche Distanz ca. 4,6 km) weniger geeignet, Stauwellen zu erkennen, da sich Stauwellen gegen die Fahrtrichtung fortsetzen, Bluetooth-Messungen aber in Fahrtrichtung stattfinden. Bluetooth-Erfassungen sollten in Bereichen mit erhöhter Wahrscheinlichkeit für Breiten Stau bzw. Mega-Stau eher außerhalb von Verdichtungsräumen errichtet werden, um dort eine Verkehrslage darzustellen. Stop&Go-Verkehr erfordert eine dichte Sensorik, um die Anteile an nicht gestautem Verkehr nicht als freien Verkehr fehlzuinterpretieren. Für Stop&Go-Verkehr sollte daher entweder Seitenradar bevorzugt oder die aktuelle streckenbezogene Erfassung verdichtet werden.

In Verdichtungsräumen mit Überkopfsensorik-Detektion ist die Autobahn in der Regel gut ausgebaut (z. B. 6- oder 8-streifiger Querschnitt). Stauwellen entstehen eher an Orten mit wenigen Fahrstreifen, so dass beispielsweise ein kumuliertes Bremsmanöver mehrerer Fahrzeuge Auswirkungen auf alle Fahrstreifen hat.

Um in temporären Arbeitsstellen die Verkehrssituation adäquat darstellen zu können, wird engmaschige Bluetooth-Detektion empfohlen, da aufgrund der Kurzfristigkeit der Ausstattung die Kalibrierung von Seitenradar-Geräten aufwändig ist (z. B. kurzzeitige Änderung der Fahrstreifenführung). Die Bluetooth-Technologie ist gut geeignet, Störfälle frühzeitig zu erkennen [11], beispielsweise in Gebieten ohne bisherige Ausstattung.

Die folgenden Abbildungen stellen die Situation nach den Analysen zusammenfassend dar. Für Verkehrsinformationen (Abbildung 49), meist repräsentiert durch eine Angabe des Zeitbedarfs bzw. – im Staufall – des Zeitverlustes, ist es nicht erforderlich, einzelne Stautypen voneinander abzugrenzen. Hierbei reicht eine Ausstattung von Seitenradar bzw. Bluetooth im Abstand von ca. 3-5 km. Zum Zweck der Planung genügt die (historische) Verkehrsinformation über vorherrschende Verkehrssituationen, da Sicherheitsaspekte eine untergeordnete Rolle spielen. So sind etwa Stauwellen und Stop&Go nicht mehr voneinander abzugrenzen, da Freiflusszeiten nicht detektiert werden. Dies ist für die Betrachtung des Zeitverlustes nicht relevant. Streckenbezogene Erfassung hat den Vorteil, auch Quelle-Ziel-Verbindungen (OD-Matrizen) zu erkennen. Somit lassen sich Planungen über einen weiten Bereich der Autobahn anstellen, die mit singulären Messungen lokaler oder mobiler Erfassung nicht möglich wären.

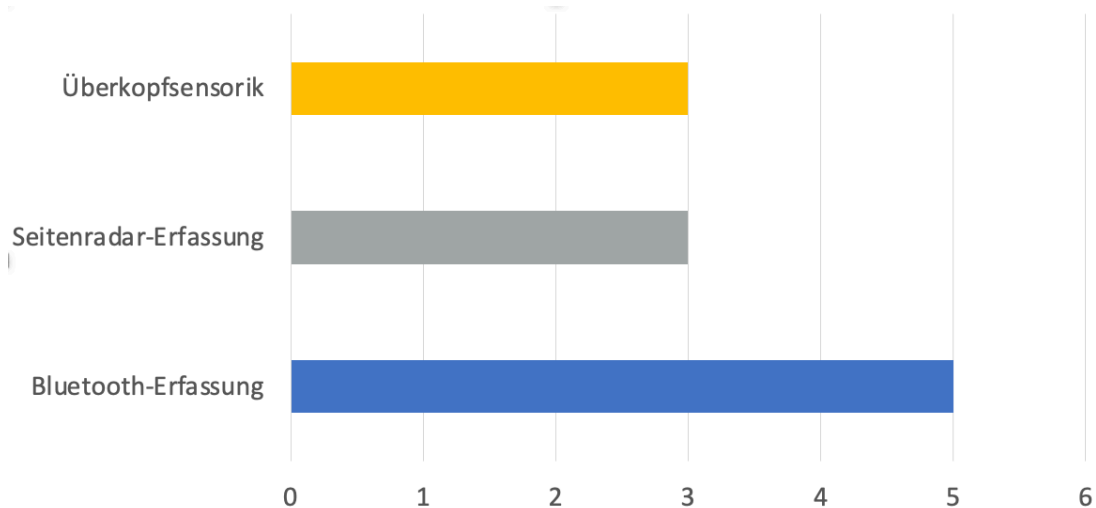


Abbildung 49 Ausstattungsempfehlungen für Verkehrsinformation je Detektorabstand (km)

Bei der Verkehrssteuerung sind auch sicherheitsrelevante Aspekte wichtig. Um die Verkehrssicherheit zu verbessern, ist es entscheidend, welcher der vier Stautypen vorliegt, um adäquat auf das Verkehrsgeschehen reagieren zu können (beispielsweise Wechselwegweisung, Umleitungsempfehlungen, Stauende-Warnungen/-Prognosen [9]). Unter anderem können durch die Kenntnis des genauen Stautyps auch Prognosen des Verkehrsgeschehens zuverlässig getätigt werden. Abbildung 50 zeigt die empfohlene Ausstattungsdichte abhängig von Stautyp und Erfassungstechnologie für die Verkehrssteuerung.

Um Stauwellen zu erkennen, ist ein dichter Abstand von ca. 1-2 km erforderlich. Andernfalls kann insbesondere bei der streckenbezogenen Erfassung die Stauung nicht genau lokalisiert werden und führt zu Unschärfen bei der Verkehrslagedarstellung. Für Stop&Go, das mit Abstand häufigste Staumuster, ist ein Sensorabstand von ca. 2 km zu empfehlen. Dies ermöglicht die Unterscheidung von Geschwindigkeiten über und unter der Staugrenzgeschwindigkeit. Bei streckenbezogener Erfassung kann sich die Geschwindigkeit auf einem erfassten Streckensegment sonst so mitteln, dass die Staugrenzgeschwindigkeit nicht unterschritten und damit kein Stau erkannt wird. Breiter Stau und Mega-Stau werden bei einer Ausstattung von ca. 4-6 km Sensorabstand zuverlässig erkannt.

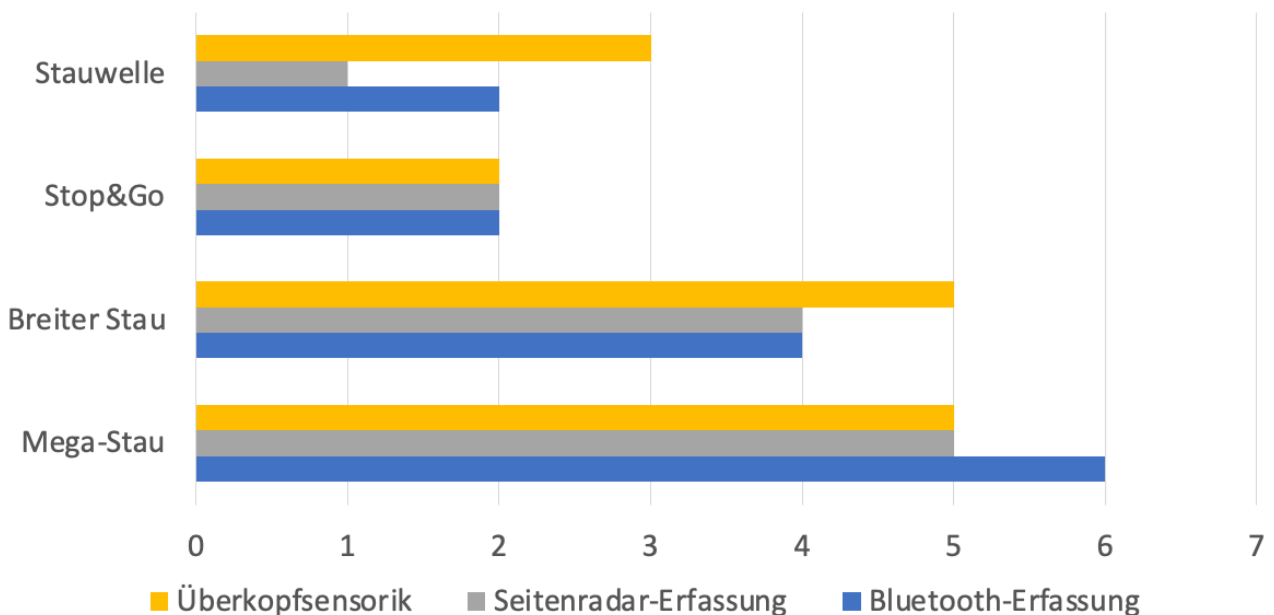


Abbildung 50 Ausstattungsempfehlung für Verkehrssteuerung je Detektorabstand (km)

Im Projekt wurden keine Strecken mit relevanten Steigungen analysiert. Für diese Strecken können keine allgemeingültigen Empfehlungen abgegeben werden. Wenn eine Steigungsstrecke ausgestattet werden soll, ist unter Umständen daher eine andere Ausstattung zu wählen. Insbesondere sollte dabei ein zusätzlicher Stautyp „Spurstau“, die fahrstreifenweise unterschiedliche Stauausbreitung, berücksichtigt werden. Durch einen hohen Schwerverkehrsanteil auf dem/den rechten Fahrstreifen sind die Geschwindigkeiten bei Steigungsstrecken dort mitunter deutlich geringer. Dabei sollte insbesondere auch auf eine erhöhte Verkehrssicherheit bei der Ausstattung geachtet werden.

Weiterhin wurden in dieser Studie nur Abschnitte mit einem mindestens 3-streifigen Ausbau je Fahrtrichtung betrachtet. Inwiefern die Ergebnisse auch auf Autobahnen mit kleineren Querschnitten übertragbar sind, muss im Vorhinein einer Ausstattung zunächst in einem kurzen Zeitraum (z.B. mehrere Wochen) geprüft werden.

## 6.2 Kostenvergleich

Die folgenden Kostenberechnungen sind auf 100 € gerundet. Die Kosten für Seitenradar, Bluetooth und Live-FCD wurden durch die ZVM bereitgestellt, hier fand keine Marktbetrachtung statt. Die Überkopf-Sensorik wurde als gegeben angenommen, da sie nicht im Rahmen des Projekts installiert wurde.

Im Rahmen der Studie wurden Seitenradar-Geräte mit entsprechender Ausstattung wie Tiefbauarbeiten und Datenschnittstellen angeschafft. Für den Kostenvergleich inklusive Stromanschluss werden diese Ausgaben auf Einzelgeräte umgerechnet und es ergibt sich:

- In Verdichtungsräumen: 47.500 € pro Seitenradar-Gerät
- Außerhalb von Verdichtungsräumen aufgrund fehlender Stromanschlüsse und weiterer Tiefbauarbeiten (beispielsweise Horizontalbohrungen für Durchpressungen): 58.500 € pro Seitenradar-Gerät

Die Kostenansätze für die Ausstattung mit Bluetooth-Geräten wurden aus dem Bluetooth-Gutachten [11] übernommen. Dort wurde für eine Ausstattung mit hohen Stückzahlen (100 Stück) streckenbezogener Verkehrsdatenerfassung 500.000 € für die Anschaffung, 15.000 € für Wartung und Service sowie 10.000 € für den Betrieb angesetzt, daher werden in diesem Projekt 5.300 € pro Bluetooth-Gerät angenommen. Diese Geräte arbeiten durch Solar weitestgehend energieautark, so dass hier eine Mischkalkulation angenommen wurde. Bluetooth-Geräte müssen weiterhin nicht an die Datenübertragung angeschlossen werden, sondern versenden erfasste Daten über Funk.

Der Studie standen qualitativ hochwertige Live-FCD für Forschungszwecke zur Verfügung, die über eine höhere Aussagekraft als üblicherweise kommerziell verfügbare Daten verfügen. Die Zellgröße der Geschwindigkeits-Rohdaten ist mit 100 m und 1 min sehr klein, so dass die Daten relativ detailliert vorliegen. Handelsübliche Daten sind zumeist mit größeren räumlichen und zeitlichen Abständen verfügbar. Die hier bei der Kostengegenüberstellung betrachteten Live-FCD haben eine nicht-äquidistante Zellgröße von ca. 500 m und 3 min. Beim Zukauf von Live-FCD ist deshalb zu empfehlen, auf eine möglichst geringe Aggregation der Daten zu dringen und eine Angabe der Aktualität der Daten zu verlangen.

Der Bezug (Zukauf) von Echtzeit-FCD für das bayerische Autobahnstreckennetz mit 5.000 km Richtungsfahrbahnen für eine Laufzeit von 10 Jahren wird wie folgt abgeschätzt. Die Kosten  $K_{FCD}$  setzen sich aus drei Faktoren zusammen: den Lizenzgebühren für das gewählte Streckennetz, einer jährlichen Bereitstellungsgebühr und dem einmalig zu zahlenden Datenaufbereitungspreis.

Für das bayerische Gesamtnetz mit 55.000 km liegen die Lizenzgebühren bei ca. 66.000 €. Die Umrechnung für 5.000 Richtungskilometer auf Autobahnen beträgt rechnerisch 6.000 €. Hierzu ist noch ein Aufschlagsfaktor mit 1,5 einzurechnen, somit sind die Lizenzgebühren mit 9.000 € anzusetzen. Die jährliche Bereitstellungsgebühr beträgt 6.000 €. Der einmalige Datenaufbereitungspreis in Höhe von 15.000 € ist noch zu addieren. Für die Kostenschätzung ergibt sich somit folgender Ansatz für 10 Jahre Laufzeit:

$$K_{FCD} = \left( \frac{5.000 \text{ km}}{55.000 \text{ km}} \cdot 66.000 \text{ €/a} \cdot 1,5 + 6.000 \text{ €/a} \right) \cdot 10 \text{ a} + 15.000 \text{ €} = 165.000 \text{ €}$$

Hierbei ist allerdings die Abhängigkeit von einem privaten Datenanbieter zu beachten, etwa die Zuverlässigkeit zukünftiger Datenlieferungen und eine gewisse Monopol-Stellung des Anbieters.

Bei der Gegenüberstellung für einen 50 km langen auszustattenden Autobahnabschnitt für beide Richtungen außerhalb eines Verdichtungsraums ergeben sich folgende Kosten:

Ausstattung	Preis
Seitenradar alle 3 km	2 Fahrrichtungen à 17 Stück à 58.500 €/Stück: 1.989.000 €
Bluetooth alle 4 km	13 Stück à 5.300 €: 68.900 €
Online-FCD	165.000 €, falls kein Teilnetz verfügbar
Online-FCD + Seitenradar alle 10 km	2 Fahrrichtungen à 6 Stück à 58.500 €: 702.000 € + 165.000 € = 867.000 €
Online-FCD + Bluetooth alle 6 km	9 Stück à 5.300 €: 47.700 € + 165.000 € = 212.700 €
Online-FCD + Bluetooth alle 6 km + Seitenradar alle 10 km	BT: 9 Stück à 5.300 € SR: 2 FR à 6 Stück à 58.500 € 47.700 € + 702.000 € + 165.000 € = 914.700 €

*Tabelle 4 Kosten für beispielhafte Ausstattungsvarianten bei 10 Jahren Laufzeit*

Dabei wird angenommen, dass Überkopf-Sensorik nicht vorhanden ist (außerhalb eines Verdichtungsraumes im Regelfall nicht installiert) und mit dieser aufgrund der hohen Kosten für Installation und Betrieb auch nicht ausgestattet werden soll.



## 7 Gewonnene Erkenntnisse zur Datenqualität

In diesem Abschnitt werden Erkenntnisse hinsichtlich der Datenqualität dargestellt, die im Laufe des Projekts gewonnen wurden, sowie auch Empfehlungen dargestellt, wie zukünftig bei vergleichbar gelagerten Projekten hinsichtlich der Sensordaten eine bessere Qualität erzielt und damit auch aussagekräftigere Ergebnisse erreicht werden können.

### 7.1 ANPR-Kameras

Neben den Erfassungsmöglichkeiten durch Überkopf-Sensorik, Seitenradar, Bluetooth und FCD wurden auch ANPR-Kameras installiert. Diese Kennzeichen erfassenden Kameras können in der hier verbauten Ausführung zum einen lokale Geschwindigkeiten fahstreifenfein messen, zum anderen Reisezeiten zwischen zwei Standorten anhand des eindeutigen Fahrzeugkennzeichens ermitteln.

Insgesamt wurden im Projekt an neun Querschnitten Kameras installiert, davon vier in Fahrtrichtung Nürnberg (zwischen AS Allershausen, km 499, und PWC Gelbensee, km 435) und fünf in Fahrtrichtung München (zwischen AS Greding, km 421, und TR Fürholzen, km 510). Der durchschnittliche Abstand zwischen zwei ausgestatteten Querschnitten beträgt etwa 30 km.

Letztlich wurden die Daten nicht, wie ursprünglich vorgesehen, zur Plausibilisierung genutzt. Die lokalen Geschwindigkeiten waren als Stützstellen für die Überkopf- bzw. Radarerfassung gedacht, die Reisezeitmessungen als Überprüfung für die ermittelten Bluetooth-Reisezeiten. Eine eigene Verkehrslagerekonstruktion nur basierend auf ANPR-Kameras war aufgrund der großen Abstände der einzelnen Sensoren wie auch schon im Endbericht von iRoute1 [10] beschrieben nicht möglich. In die Ausstattungsempfehlungen in Kapitel 6.1 sind deshalb keine ANPR-Daten eingeflossen.

Ein Standort lieferte während der Projektlaufzeit aufgrund technischer Probleme keine Daten, andere sind immer wieder monatsweise ausgefallen und weisen daher deutliche Datenlücken auf. Manche Standorte lieferten unplausible lokale Geschwindigkeiten, beispielsweise sehr hohe Tagesmittelwerte auf dem rechten Fahstreifen. Andere Standorte wurden durch die einrichtende Firma fehlerhaft kalibriert und erfassten nicht den Mittelpunkt der jeweiligen Fahstreifen.

In Anbetracht des nicht unerheblichen Aufwands, den die Bereitstellung dieser Kameras verursacht hat, ist für zukünftige Projekte, bei denen ANPR-Kameras zum Einsatz kommen sollen, zu empfehlen, eine Vorstudie und ein durchgängiges Qualitätssicherungskonzept einzuplanen, im Rahmen derer die Kameras installiert, kalibriert sowie im laufenden Betrieb geprüft werden und somit eine qualitativ gute Datenerfassung sichergestellt werden kann. Dies muss auch ein geeignetes Datenschutzkonzept umfassen. Bei guter Datenlage sind ANPR-Kameras durchaus eine nennenswerte Bereicherung für die Verkehrserfassung, da auch Gefahrguttransporte, Länderkennungen, Fahrzeugtypen etc. erfasst werden können und prinzipiell hohe Stichproben bei den Reisezeitmessungen möglich sind.

### 7.2 Datenqualitätssicherung

Nicht nur bei ANPR-Kameras ist die Datenerfassung mit einer guten Datenqualität eine Herausforderung. Auch die anderen Datenquellen lieferten nicht durchweg qualitativ gute Daten.

#### 7.2.1 Überkopf-Sensorik

Selbst bei Sensorik, deren Betrieb seit langem etabliert ist, wie beispielsweise Überkopf-Erfassung, gibt es Datenausfälle. Im Projektzeitraum waren dies unter anderem Datenübertragungsprobleme oder beispielsweise Doppelinduktionsschleifenaustausche, ohne den Schleifentyp (Abstand der Doppelschleife) in der hinterlegten Datenbank zu aktualisieren.

## 7.2.2 Bluetooth-Sensorik

Bluetooth-Scanner wurden ohne entsprechende Kommunikation, um die Änderungen entsprechend bei den Auswertungen berücksichtigen zu können, an andere Standorte gebracht, was eine Änderung der Reisezeiten durch längere/kürzere Strecken mit sich brachte. Standortverschiebungen um 200 km sind dabei natürlich einfacher zu erkennen und auszusortieren als Verschiebungen um wenige Hundert Meter.

## 7.2.3 Seitenradar-Sensorik

Radargeräte waren beispielsweise statt Richtung Straße in die Richtung einer Ausfahrt auf einen Parkplatz gedreht. Somit wurde auf dem Verzögerungstreifen durchgehend „Stau“ gemessen.

## 7.2.4 Floating-Car-Daten

Die in dieser Studie kostenneutral erhaltenen Floating-Car-Daten standen nur für einen begrenzten Zeitraum zur Verfügung (bis einschließlich Dezember 2019), so dass der Untersuchungszeitraum nicht beliebig nach hinten geschoben werden konnte. Während des Bezugs der FCD waren aber u.a. Arbeitsstellen (insbesondere längerer Dauer) errichtet, so dass nicht alle Standorte installierter Sensorik fließenden Verkehr erfassen konnten, sondern teilweise auch die Baustellenfahrzeuge detektiert wurden.

## 7.2.5 Fusion der Datenquellen

Im Projekt haben die verschiedenen Ausfälle einzelner Sensoriken leider dazu geführt, dass für die Datenfusion nur wenige Tage mit qualitativ guten Daten aller Quellen zur Verfügung standen. Hier wurde dies so gelöst, dass für jede Datenerfassung einzeln zumindest zwei Monate nutzbarer Daten vorlagen und über die zeitlichen bzw. räumlichen Stauschwerpunkte der Vergleich ermöglicht wurde.

## 7.2.6 Vorschläge für zukünftige Maßnahmen und Vorgehensweisen

Generell wird vor der Inbetriebnahme und während des Betriebs neuer als auch bereits installierter Sensorik empfohlen, eine gute Datenqualität sicherzustellen. Dies beginnt bei den entsprechenden Ausschreibungen zu neuer Erfassung, über die Kalibrierung und Wartung, bis hin zur Anbindung an die Datenserver. Eine gute Datenqualitätssicherung ist daher nicht nur bei neuen Sensoren, sondern auch bei bereits installierter Sensorik unerlässlich und sollte je nach Umfang der auszustattenden Strecke gegebenenfalls als eigenes – dauerhaftes – Projekt angelegt werden.

Außerdem sollte darauf geachtet werden, eine unter Umständen längere Projektlaufzeit vorzusehen, um Datenlücken, d.h. Ausfälle auf Seiten der Sensorik, besser abfedern zu können. Sicherlich ist es unvermeidbar, dass manchmal Datenausfälle auftreten können (z. B. Serverumzug und fehlende Anbindung an Datennetze). Abhängig davon, wie viele Parteien an der Datenlieferung beteiligt sind (z. B. hier Anzahl der Erfassungstechnologien), ist es sinnvoll, den Erfassungszeitraum deutlich länger zu veranschlagen als es vom tatsächlichen Aufwand her erforderlich wäre. So können Datenlücken und -ausfälle frühzeitig erkannt und Datenerhebungen verschoben werden.

Auch sollte im Rahmen vergleichbarer Projekte ein intensiver Informationsaustausch u.a. hinsichtlich geplanter Aktivitäten als auch festgestellter Unstimmigkeiten zwischen dem operativen Straßenbetriebpersonal und dem Projektteam dazugehören, um die o.g. Schwierigkeiten bereits frühzeitig erkennen und adressieren zu können. Dazu gehört auch die Einbeziehung in die Planung anstehender Arbeitsstellen.

## 8 Zusammenfassung und Fazit

Im Projekt iRoute2 geht es um Empfehlungen zur flächendeckenden Ausstattung mit Verkehrssensorik mit dem Ziel, die Verkehrslage so genau wie möglich darzustellen. Dabei wurden die Ausstattungsvarianten je nach Zweck der Ausstattung in Verkehrssteuerung/Störfallerkennung und Verkehrsinformation/Verkehrslageermittlung unterschieden. Für Verkehrsinformation reicht eine gröbere Ausstattung aus als für Verkehrssteuerung, bei der die aktuelle Verkehrssituation detailliert dargestellt werden muss.

Im bayerischen Autobahnnetz wurden verschiedene Arten von Störfällen identifiziert (vier Stautypen: Stauwelle, Stop&Go, Breiter Stau, Mega-Stau). Anhand von historischen Daten aus etwa zwei Monaten aus dem Jahr 2019 wurden lokale Erfassung (Überkopf-Sensorik und Seitenradar), mobile Erfassung (Floating-Car-Daten) und streckenbezogene Erfassung (Bluetooth-Detektion) gegenübergestellt und bewertet. Auch die Erkenntnisse des FGSV-Papiers zum Data Mining in Verkehrsmanagement und Verkehrsplanung [21] wurden berücksichtigt. Für jeden Stautyp und jede Erfassungstechnologie wurden Stauschwerpunkte auf der betrachteten Strecke der A9 herausgearbeitet und so eine Bewertung jeder Kombination vorgenommen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die aktuelle Ausstattung in Verdichtungsräumen mit vorhandener Ausstattung (SBA) eine ausreichende Verkehrslage ermittelt und Störfälle adäquat erkennt.

Für die **Verkehrssteuerung** und die Betrachtung einzelner Stautypen wird in Verdichtungsräumen ohne bisherige Sensorik eine Ausstattungskombination von Online-FCD, Bluetooth (4-6 km) und Seitenradar (5-10 km, abhängig von der Anzahl der Störungen) empfohlen. Außerhalb von Verdichtungsräumen und in Bereichen mit wenigen auftretenden Stauereignissen ist eine Kombination von FCD und Seitenradar als Stützstellen im Abstand von ca. 10 km ausreichend. Folgende Tabelle fasst die Ergebnisse hinsichtlich der Ausstattungsempfehlung für die Verkehrssteuerung zusammen:

Strecke	Wirtschaftliche Ausstattungsempfehlung für die Verkehrssteuerung
Verdichtungsraum mit vorhandener Ausstattung (Überkopfsensorik-Detektion)	Keine Verdichtung erforderlich
Verdichtungsraum ohne vorhandene Ausstattung in hochstörungsauffälligen Bereichen	Online-FCD + Bluetooth (4-6 km) + Seitenradar (5-8 km)
Verdichtungsraum ohne vorhandene Ausstattung in teilweise störungsauffälligen Bereichen	Online-FCD + Bluetooth (4-6 km) + Seitenradar (8-10 km)
Verdichtungsraum ohne vorhandene Ausstattung in nichtstörungsauffälligen Bereichen	Online-FCD + Seitenradar (10 km)
Strecken außerhalb Verdichtungsräumen	Online-FCD + Seitenradar (10 km)

*Tabelle 5 Ausstattungsempfehlung für Verkehrssteuerung pro betrachteter Strecke und vorhandener Ausstattung*

Für die **Verkehrslage** sollte in Verdichtungsräumen ohne bisherige Ausstattung lokale (Seitenradar), mobile (FCD) und streckenbezogene Erfassung (Bluetooth) installiert werden, um neben der reinen Geschwindigkeitsinformation durch Live-FCD auch die Anzahl der Fahrzeuge und deren Quelle-Ziel-Kombinationen zu erfassen. Seitenradar sollte dabei in Abständen von ca. 10 km, Bluetooth in Abständen von ca. 7-10 km errichtet werden. Dies ermöglicht zum einen eine genauere Verkehrslageermittlung, die auch Aussagen zu möglichen Restkapazitäten treffen und somit als Grundlage für Prognoseverfahren dienen kann, und zum anderen erweiterte statistische Betrachtungen. In Bereichen außerhalb von Verdichtungsräumen sollte weitestgehend auf mobile Erfassung in Echtzeit durch fahrzeuggenerierte Daten gesetzt werden, falls dort die Installation fester Sensorik aufgrund von Tiefbauarbeiten und zusätzlichen Versorgungsleitungen nicht wirtschaftlich effizient möglich ist.

Mobile Detektion durch Floating-Car-Daten liefert neben der Überkopf-Sensorik die genauesten Verkehrslagen. Beim Datenbezug durch FCD ist allerdings die Abhängigkeit vom jeweiligen Datenanbieter zu beachten. Da durch FCD aber keine Verkehrsstärke erfasst werden kann, ist es sinnvoll, zusätzlich Stützstellen mit Seitenradar im Abstand von ca. 8-10 km in bisher nicht detektierten Bereichen zu installieren.

Abhängig vom Ziel der Erfassung (beispielsweise Reisezeitschätzungen, Geschwindigkeitsinformationen, Störfallerkennung) ist eine unterschiedliche Ausstattung sinnvoll. Wie auch schon im Projektendbericht zu iRoute1 [10] genannt, ist eine Ausstattung vor Knotenpunkten sowie keine streckenbezogene Erfassung über Knotenpunkte hinweg sinnvoll. Zur Fahrzeugzählung und -klassifizierung wird in Verdichtungsräumen ohne SBA-Ausstattung zumindest für jeden Streckenabschnitt die Errichtung eines lokalen Messquerschnitts (Seitenradar) empfohlen.

Durch die Betrachtung einzelner Stautypen können detailliertere Verkehrsflussanalysen durchgeführt werden, als beispielsweise in Abbildung 7, Reisezeitverluste in Bayern 2017, dargestellt.

Es ist darauf hinzuweisen, dass in iRoute2 teils andere Ergebnisse als im Bluetooth-Gutachten [11] erzielt wurden, die allerdings nicht direkt gegenübergestellt werden können. Zum einen ist die Zielsetzung anders (im Gutachten wurde auch der Aspekt der Netzbeeinflussung betrachtet, für den ein größerer Sensorabstand ausreicht), zum anderen wurde in iRoute2 der Vergleich mit anderen Erfassungstechnologien angestellt, nicht die Bewertung einer einzelnen Technologie.

Die Ergebnisse sind in dieser Form grundsätzlich auch auf andere Autobahnen und Bundesländer übertragbar. Allerdings ist darauf hinzuweisen, dass hier eine der hochbelastetsten Autobahnabschnitte Deutschlands betrachtet wurde und dies möglicherweise die Vergleichbarkeit mit anderen Bundesländern einschränkt. Weiterhin erfolgte die Einordnung durch Stautypen auf historischen Daten. Insbesondere sollten bei einer Neuausstattung als Grundlage die Verkehrsstärke und die Störungsauffälligkeit betrachtet werden. Das bedeutet, dass Abschnitte ohne bisherige Ausstattung für die Einordnung betrachtet werden müssen und daher zunächst in einem kurzen Zeitabschnitt (z. B. mehrere Wochen) Verkehrsdaten erhoben werden sollten, um die Wahrscheinlichkeit störungsauffälliger Ereignisse je Teilabschnitt der betrachteten Strecke richtig einschätzen zu können.

## 9 Literaturverzeichnis

- [1] B. Karl, L. Kessler und K. Bogenberger, „Automatisierte Klassifikation verschiedener Stautypen,“ *Heureka*, 2020.
- [2] B. Karl, L. Kessler und K. Bogenberger, „Automated Classification of Different Congestion Types,“ *IEEE ITSC*, 2019.
- [3] L. Kessler, G. Huber, A. Kesting und K. Bogenberger, „Comparison of Floating-Car Based Speed Data with Stationary Detector Data,“ *TRB-AM*, 2018.
- [4] L. Kessler, G. Huber, A. Kesting und K. Bogenberger, „Comparing Speed Data from Stationary Detectors Against Floating-Car Data,“ *IFAC CTS*, 2018.
- [5] L. Kessler, B. Karl und K. Bogenberger, „Congestion Hot Spot Identification using Automated Pattern Recognition,“ *IEEE ITSC*, 2020.
- [6] M. Treiber und D. Helbing, „Reconstructing the Spatio-Temporal Traffic Dynamics from Stationary Detector Data,“ *Cooper@tive Tr@nsport@tion Dyn@mics*, 2002.
- [7] F. Rempe, P. Franek, U. Fastenrath und K. Bogenberger, „A Phase-Based Smoothing Method for Accurate Traffic Speed Estimation with Floating-Car Data,“ *Transportation Research Part C*, 2017.
- [8] L. Kessler, F. Rempe und K. Bogenberger, „Multi-Sensor Data Fusion for Accurate Traffic Speed and Travel Time Reconstruction,“ *TRB-AM*, 2021.
- [9] F. Rempe, L. Kessler und K. Bogenberger, „Fusing Probe Speed and Density Data for Robust Short-Term Congestion Front Forecasts,“ *IEEE MT-ITS*, 2017.
- [10] G. Listl, S. Dellner, T. Singer, M. Kölle, S. Buhle, M. Spangler, G. Jakob, A. Dobschütz, J. Grötsch und M. Müller, „Projekt iRoute - Stufe 1 -- Messstellenverdichtung zur Verbesserung der Verkehrssteuerung,“ München, 2012.
- [11] G. Listl, S. Dellner, M. Margreiter und M. Spangler, „Empfehlungen für den Einsatz von Bluetooth- Scannern auf BAB zur Reisezeitermittlung und Störfallerkennung,“ 2019.
- [12] M. Margreiter, M. Spangler, T. Zeh und C. Carstensen, „Bluetooth-Measured Travel Times for Dynamic Re-Routing,“ *Annual International Conference on ACE*, 2015.
- [13] M. Margreiter, „Automatic Incident Detection Based on Bluetooth Detection in Northern Bavaria,“ *Transportation Research Procedia* 15, 2016.
- [14] M. Margreiter, „Fast and Reliable Determination of the Traffic State Using Bluetooth Detection on German Freeways,“ *14th World Conference on Transport Research*, 2016.
- [15] M. Margreiter, F. Busch und C. Carstensen, „The Evolution of Bluetooth Detection Rates,“ *TRB-AM*, 2019.
- [16] L. Kessler, B. Karl und K. Bogenberger, „Spatiotemporal Traffic Speed Reconstruction from Travel Time Measurements Using Bluetooth Detection,“ *IEEE ITSC*, 2019.
- [17] G. Huber, K. Bogenberger und R. Bertini, „New Methods for Quality Assessment of Real Time Traffic Information,“ 2014.
- [18] G. Huber und K. Bogenberger, „Eine Bewertungs- und Optimierungsmethode für dynamische Verkehrslagedarstellungen,“ *Heureka*, 2014.
- [19] K. Bogenberger und S. Weikl, „Quality Management Methods for Real-Time Traffic Information,“ 2012.
- [20] K. Bogenberger, „Qualität von Verkehrsinformationen,“ 2003.
- [21] A. Leonhardt, M. Bachleitner, S. Gabloner, R. Kohlen, C. Maget, F. Maier, M. Margreiter, J. Mück, J. Schlaich und P. Wagner, „Data Mining in Verkehrsmanagement und Verkehrsplanung,“ FGSV-Verlag, 2019.