



INSTITUT
FÜR

FAHRZEUGTECHNIK
PROF. DR.-ING. F. KÜÇÜKAY

Simulation von infrastrukturellen Umfelderfassungslösungen zur Systemkonzeptbewertung

Masterarbeit

erstellt von Viviane Bremer
Braunschweig, der 13. Juni 2019

Technische Universität Braunschweig
Institut für Fahrzeugtechnik
Direktor: Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay
Betreuer: Adrian Sonka

M A S T E R A R B E I T

Bearbeiter: Viviane Bremer, B.Sc., Matrikelnummer: 4254652

Simulation von infrastrukturellen Umfelderfassungslösungen zur Systemkonzeptbewertung

*Simulation of Infrastructural Environment Perception Systems
for a Concept Evaluation*

Aktuell gibt es ein großes Aktivitätsfeld im Bereich des vernetzten und automatisierten Fahrens im Straßenverkehr. Für die Bewältigung der neuen Anforderungen an den Verkehr werden vermehrt verteilte Systemkonzepte untersucht und eingesetzt, die das fahrzeugspezifisch erfassbare Lagebild durch den Einsatz der drahtlosen Informationsweitergabe zwischen Verkehrsteilnehmern untereinander, mit einer intelligenten Infrastruktur sowie der Einbindung von Hintergrundsystemen erweitern.

Hierbei entstehen generelle Fragestellungen zum Aufbau und der Architektur der entstehenden Lösungen, was den Kontext der vorliegenden Arbeit stellt. Ziel ist es hierbei, ein Simulations-Tool zu erstellen, welches für die Modellierung und Analyse verteilter Umfelderfassungslösungen nutzbar ist. Gelingt es deren relevanten Eigenschaften der einzelnen Bausteine zu modellieren, so ermöglicht das Tool die zielgerichtete Auslegung, Analyse und Bewertung von Systemkonzepten.

Die Ausarbeitung der Masterarbeit umfasst folgende Teilschritte:

- Recherche über die Standards der infrastrukturseitigen Sensorik und Umfelderfassung für den automatisierten Straßenverkehr
- Herausarbeiten der technischen und nichttechnischen Systemeigenschaften (z.B. Genauigkeiten/Kosten)
- Implementierung in Form einer ablauffähigen Simulation mithilfe objektorientierter Programmierung in C++
- Kritische Evaluation und Abschlussbewertung der erreichten Ergebnisse

Bearbeitungshinweise:

- Weitere Angaben sind bei Bedarf zu erfragen oder zweckmäßig anzunehmen.
- Die Bearbeitungsdauer beträgt 6 Monate.
- Der Kandidat hat eine eidesstattliche Erklärung abzugeben, dass er die Studienarbeit ohne unerlaubte fremde Hilfe oder Beratung und nur unter Verwendung der angegebenen wissenschaftlichen Hilfsmittel angefertigt hat.
- Die Arbeit bleibt Eigentum des Instituts.
- Unentschuldigt verspätet eingelieferte Arbeiten werden nicht angenommen und mit 5,0 beurteilt.

Ausgegeben am: 01.11.2018

Abgabe am: 18.06.2019

Adrian Sonka, M.Sc.

Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay

Sperrklausel

Die Ausgabe der vorliegenden Masterarbeit mit dem Titel „Simulation von infrastrukturellen Umfelderfassungslösungen zur Systemkonzeptbewertung“ ist ausschließlich unter Genehmigung der Institutsleitung zulässig.

Braunschweig, den 13. Juni 2019

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere an Eides statt, dass ich die vorliegende Masterarbeit mit dem Titel „Simulation von infrastrukturellen Umfelderfassungslösungen zur Systemkonzeptbe-wertung“, ohne unerlaubte fremde Hilfe oder Beratung und nur unter Verwendung der angegebenen wissenschaftlichen Hilfsmittel angefertigt habe.

Braunschweig, den 13. Juni 2019

Viviane Bremer

Kurzfassung

Für die Gestaltung einer komfortablen, sicheren, energie- und verkehrseffizienten Mobilität wird an der Automatisierung des Verkehrs geforscht. Dafür werden Konzepte erarbeitet, bei denen Fahrzeuge und die Infrastruktur sowohl mit Umfelderfassungssensoren als auch mit Kommunikationsmodulen ausgestattet werden. Dabei entstehen Fragestellungen bezüglich des Aufbaus und der Architektur der entstehenden Lösungen. Für die Analyse der Systemkonzepte vor ihrem Einsatz, wird im Rahmen dieser Arbeit ein Auslegungstool erzeugt. Hierfür werden zunächst die Sensoreigenschaften herausgearbeitet und bestehende Systemkonzepte untersucht. Mit Hilfe dieser Erkenntnisse wurden Anforderungen an ein Auslegungstool ermittelt. Die Anforderungen wurden schließlich in Matlab umgesetzt. Mit vier verschiedenen Szenen wurde die Anwendbarkeit evaluiert. Die Evaluation ergab, dass eine Konzeptanalyse bereits möglich ist, jedoch besteht noch ein großes Ausbaupotential, um eine detailliertere Analyse zu ermöglichen.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Masterarbeit unterstützt und motiviert haben.

Zuerst gebührt mein Dank meinen drei Betreuern Adrian Sonka, Sascha Knacke-Langhorst und Theresa Hobrecht. Für gute Zusammenarbeit, die hilfreichen Anregungen und die konstruktive Kritik bei der Erstellung dieser Arbeit möchte ich mich herzlich bedanken. Außerdem möchte ich mich dafür bedanken, dass eine Zusammenarbeit zwischen dem Institut für Verkehrstechnik des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) und dem Institut für Fahrzeugtechnik (IFF) der Technische Universität Braunschweig (TU BS) auch ohne Projektvertrag möglich war.

Außerdem möchte ich mich bei meinen Schwiegereltern, meiner Schwägerin und meiner Nachbarin bedanken, die mir regelmäßig meine Tochter abgenommen haben sodass ich überhaupt diese Arbeit verfassen konnte.

Abschließend möchte ich mich bei meinem Mann dafür bedanken, dass er immer für mich da ist und mir so häufig weitergeholfen hat.

Viviane Bremer

Braunschweig, den 13. Juni 2019

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	X
Tabellenverzeichnis	XII
Abkürzungsverzeichnis	XIII
Symbolverzeichnis	XV
1 Einleitung	1
2 Grundlagen	2
2.1 Begriffserklärung „Umfeld“	2
2.2 Sensorik zur Umfelderfassung	2
2.2.1 Ultraschall	2
2.2.2 Radar	4
2.2.3 Lidar	7
2.2.4 Kamera	8
2.3 Datenverarbeitung	10
2.3.1 Objekterkennung	11
2.3.2 Tracking	12
2.3.3 Sensordatenfusion	13
3 Anwendungen zur Umfelderfassung	16
3.1 Im Fahrzeug	16
3.1.1 Teilautomatisierung	16
3.1.2 Vollautomatisierung	18
3.2 In der Infrastruktur	21
3.2.1 Mobile Sensorkonfigurationen	21
3.2.2 Stationäre Sensorkonfigurationen	22
4 Anforderungen an das Simulations-Tool	25
4.1 Komponenten des Simulations-Tools	25
4.1.1 Sensoren	26
4.1.2 Objekte	26

4.1.3	Umgebung	27
4.1.4	Auswertung	27
4.2	Anforderungsliste	28
5	Simulations-Tool	30
5.1	Benutzeroberfläche	30
5.2	Programmablauf	32
5.3	Implementierung	34
5.3.1	Umgebung	34
5.3.2	Objekte	36
5.3.3	Sensoren	38
5.3.4	Auswertung	40
6	Studie zur Anwendung des Tools	44
6.1	Einfluss des Objektabstandes	44
6.2	Umwelteinflüsse	46
6.3	Vergleich von zwei Sensorkonfigurationen	48
6.4	Forschungskreuzung	53
6.5	Evaluation	58
7	Zusammenfassung und Ausblick	59
Literatur		60
Anhang		65

Abbildungsverzeichnis

1	Veranschaulichung des Trilaterationsprinzips für ein rundes Objekt	3
2	Beispielhafter Frequenzverlauf der Signalerzeugung vom Radar [35]	5
3	Ansätze zur Winkelbestimmung beim Radar [35]	6
4	Ansätze zur Winkelbestimmung beim Lidar [35]	8
5	Rektifiziertes Stereokamerasystem	9
6	Schematischer Ablauf der Datenverarbeitung [35]	10
7	Vergleich von zwei Bilderkennungsalgorithmen	11
8	Vergleich zwischen Kanten- und Eckendetektor.	12
9	Ansätze der Datenaufnahme für die Datenfusion [19]	14
10	Explizite Sensordatenfusion mit synchronen Sensoren [19]	14
11	Zwei verschiedene Fahrzeugkonfigurationen	17
12	Transportabler Sensoraufbau	22
13	Sensoraufbau der Ko-PER Kreuzung in Aschaffenburg [26]	23
14	Sensorkonfiguration der Forschungskreuzung in Braunschweig [6]	23
15	Komponenten des Simulations-Tools	25
16	Grafische Benutzeroberfläche des Software-Tools	31
17	Flussdiagramm des Programmablaufs	33
18	Flussdiagramm der Umgebungserzeugung	35
19	Auswählbare Straßenführungen	35
20	Flussdiagramm der Objekterzeugung	37
21	Flussdiagramm der Sensorerzeugung	38
22	Dialogfenster der Sensorausstattung	39
23	Berücksichtigung des blinden Sensorbereichs	40
24	Flussdiagramm der Auswertung	41
25	Schematische Darstellung der Objekterkennung	42
26	Eingabematrix der Wahrscheinlichkeiten der Objekterkennungseinflüsse	42
27	Ausgabematrix der Auswertung	43
28	Ausgangssituation für die Darstellung des Einfluss des Objektabstandes	45
29	Zeitverlauf der Erkennungswahrscheinlichkeit und des Objektabstandes	45
30	Infrastruktur erfasst mit einer Kamera ein Objekt	46
31	Einfluss von Regen auf die Erkennungswahrscheinlichkeiten	47
32	Einfluss von Nebel auf die Erkennungswahrscheinlichkeiten	48

33	Szene zum Vergleich der Sensorkonfiguration vom FASCarE und TIAMO	50
34	Erkennungswahrscheinlichkeiten von FASCarE und TIAMO bei Tag	52
35	Drei Szenen auf der Forschungskreuzung	54
36	Objekttrajektorien und -aufenthaltszeiten auf der Forschungskreuzung	55
37	Erkennungswahrscheinlichkeiten der Forschungskreuzung	56
38	Vergleich der Erkennungswahrscheinlichkeiten der Forschungskreuzung	57
39	Erkennungswahrscheinlichkeiten von FASCarE und TIAMO bei Nacht .	65
40	Erkennungswahrscheinlichkeiten der Forschungskreuzung bei Nebel .	66

Tabellenverzeichnis

1	Einsatz von Sensoren im Fahrzeug	19
2	Einsatz von Sensoren in der Infrastruktur	24
3	Anforderungen an die Implementierung	28
4	Grundmaße von Verkehrsteilnehmern in [m] [36]	36
5	Sensorkonfiguration von Objekt 1	44
6	Sensorkonfiguration der Infrastruktur	47
7	Sensorkonfigurationen des FASCarE (DLR) und des TIAMO (TU BS) . .	49
8	Genauigkeiten und Latenzen der zwei Sensorkonfigurationen	51
9	Sensorkonfiguration für den Innenbereich der Forschungskreuzung . .	53
10	Spezifikationen einer Auswahl von Sensoren	67

Abkürzungsverzeichnis

ACC	Adaptive Cruise Control
AIM	Anwendungsplattform Intelligente Mobilität
C2X	Car-to-X
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
FASCarE	Fahrerassistenzsysteme Car Elektrisch
FIR	Ferninfrarot
FMCW	Frequency Modulated Continous Wave
IFF	Institut für Fahrzeugtechnik
I2V	Infrastructure-to-Vehicle
IR	Infrarot
Ko-PER	Kooperative Perzeption
Lkw	Lastkraftwagen
LRR	Long Range Radar
NIR	Nahinfrarot
Pkw	Personenkraftwagen
PMD	Photomischdetektor
RTK-GPS	Real-Time Kinematic Inertialnavigationssystem
SRR	Short Range Radar
TIAMO	Testing of Integrated Automation and Monitoring Systems
TU BS	Technische Universität Braunschweig
ULF	Unbemanntes Luftfahrzeug

UV Ultraviolet

Symbolverzeichnis

a, c	-	empirische Koeffizienten
B	[m]	Breite
b	[mm]	Basisbreite
c_L	[m/s]	Lichtgeschwindigkeit
c_S	[m/s]	Schallgeschwindigkeit
D	[m]	Abstand
d	-	Disparität
f	[mm]	Brennweite
f_{Chirp}	[1/s]	Chirpfrequenz
$f_{Doppler}$	[1/s]	Dopplerfrequenz
f_0	[1/s]	Trägerfrequenz
G	-	Beobachtungsmatrix
H	[m]	Höhe
I_S	[W]	Schallintensität
k	-	Zeitschritt
L	[m]	Länge
m_ω	-	Treppensteigung der Momentanfrequenz
P_V	-	Kovarianz des Beobachtungsrauschen
P_k	-	Kovarianzmatrix
p	-	Wahrscheinlichkeitsdichte
$p_{Abstand}$	[%]	Erkennungswahrscheinlichkeit des Objektabstandes
$p_{Algorithmus}$	[%]	Erkennungswahrscheinlichkeit des Algorithmus
p_{Gesamt}	[%]	Gesamterkennungswahrscheinlichkeit
p_{Regen}	[%]	Erkennungswahrscheinlichkeit bei Regen
p_{Tag}	[%]	Erkennungswahrscheinlichkeit der Tageszeit
$p_{Witterung}$	[%]	Erkennungswahrscheinlichkeit der Witterung
R	[mm/h]	Regenrate
R_{max}	[m]	maximale Reichweite
R_{min}	[m]	minimale Reichweite
S	-	stochastisches Systemrauschen
s	[m]	Senderabstand
s_k	-	Realisierung des stochastischen Systemrauschen

s_p	[μm]	Größe des Bildpunktes
T_{Mess}	[ms]	Messlatenz
V	-	stochastisches Beobachtungsrauschen
v_k	-	Realisierung des stochastischen Beobachtungsrauschen
W_k^i	-	Gewicht
X_k	-	zu schätzende Größen
X_l	-	Bildpunkt links
X_r	-	Bildpunkt rechts
X_W	-	Weltpunkt
x, y, z	-	Raumkoordinaten
x_0, y_0, z_0	-	Koordinatenursprung
Y_k	-	Beobachtungen
z_C	[m]	Abstand zwischen Bildebene und Weltpunkt
α	[$^\circ$]	horizontaler Ausrichtungswinkel
β	[$^\circ$]	vertikaler Ausrichtungswinkel
$\Delta T_{Delay_{Min}}$	[ms]	Zeitversatz zwischen Realität und Modell
Δt	[s]	Laufzeit
$\Delta\phi$	[$^\circ$]	Winkelauflösung
ρ_L	[%]	Reflexionsgrad des Lichts
ρ_S	[%]	Reflexionsgrad des Schalls
π	-	Kreiszahl
ϕ	[$^\circ$]	Öffnungswinkel
ϕ_h	[$^\circ$]	horizontaler Öffnungswinkel
ϕ_v	[$^\circ$]	vertikaler Öffnungswinkel
ω_{obj}	[1/s]	Objektkreisfrequenz
ω_0	[1/s]	Eigenkreisfrequenz

1 Einleitung

Seit über 10 Jahren besteht ein großes Aktivitätsfeld im Bereich des vernetzten und automatisierten Fahrens. Das Ziel ist die Automatisierung des Verkehrs, um die Mobilität energieeffizient, komfortabel, sicher und verkehrseffizient zu gestalten [6].

Um dies zu erreichen, werden verschiedene Konzepte erarbeitet, bei denen Fahrzeuge und Infrastruktur mit Sensorik zur Umfelderfassung ausgestattet werden, wie z.B. in [33] und [24]. Diese Konzepte sollen für die drahtlose Informationsweitergabe des so erfassten fahrzeugspezifischen Lagebildes zwischen den Verkehrsteilnehmern genutzt werden [6]. Dadurch entstehen generelle Fragestellungen bezüglich des Aufbaus und der Architektur der entstehenden Lösungen. Um diese Systemkonzepte noch vor ihrem Einsatz zu analysieren, wird ein Auslegungstool benötigt.

Ziel dieser Arbeit ist die Erstellung eines Simulations-Tools, um Systemkonzepte zielgerichtet auszulegen, zu analysieren und zu bewerten. Hierfür müssen die einzelnen Sensoreigenschaften herausgearbeitet und systematisch abgebildet werden.

Kapitel 2 erläutert zunächst die Funktionsweisen und Eigenschaften der Umfelderfassungssensoren Ultraschall, Radar, Lidar und Kamera. Anschließend wird auf die Datenverarbeitung eingegangen. Hierzu gehört die Objekterkennung, das Tracking und die Sensordatenfusion. In Kapitel 3 werden bestehende Systemkonzepte bei Fahrzeugen und in der Infrastruktur vorgestellt. Anschließend werden in Kapitel 4 die Anforderungen an ein Simulations-Tool zur Systemkonzeptbewertung herausgearbeitet. Die Umsetzung des Tools wird in Kapitel 5 vorgestellt. Kapitel 6 umfasst die Anwendung des Tools für verschiedene Systemkonzepte. In Kapitel 7 werden mögliche Erweiterungen des Tools, die im Rahmen dieser Arbeit nicht implementiert worden sind, vorgestellt.

2 Grundlagen

Dieses Kapitel definiert zunächst den Begriff der „Umgebung“. Anschließend werden Sensoren zur Umfelderfassung vorgestellt und deren Funktionsprinzipien erläutert. Abschließend wird auf die Sensordatenverarbeitung eingegangen. Dazu gehören die Datenfusion, die Objekterkennung und das Tracking.

2.1 Begriffserklärung „Umfeld“

Bei der Umgebung wird zwischen dem statischen und dem dynamischen Umfeld unterschieden. Zu ersterem gehören unter anderem der Verlauf der Fahrstreifen, Kreuzungen und statische Objekte wie Baustellen, Verkehrsschilder oder Brücken. Alle dynamischen Objekte wie Lastkraftwagen (Lkw), Personenkraftwagen (Pkw), Fahrradfahrer und Fußgänger gehören zum dynamischen Umfeld. Auch der Status von Lichtsignalanlagen oder die Witterung gehören hierzu.

2.2 Sensorik zur Umfelderfassung

Die Sensoren zur Umfelderfassung werden in entfernungsgebende und bildgebende Sensoren unterschieden. Zu ersterem gehören der Ultraschall, das Radar und das Lidar. Zu letzterem zählt die Kamera mit dem sichtbaren und dem Infrarotspektrum. Im Folgenden werden die einzelnen Sensorprinzipien erläutert.

2.2.1 Ultraschall

Als Ultraschall werden die Schallfrequenzen zwischen 20 kHz und 10 GHz bezeichnet [14]. Sie sind für das menschliche Ohr nicht hörbar. Die Messung mit Ultraschall gehört zu den Laufzeitmessungen. Ein Sender emittiert Schallwellen, die von Objekten reflektiert werden. Zur Schallerzeugung und -empfang wird bei Ultraschallsensoren eine Membran aus einer Piezokeramik eingesetzt [35]. Zum Aussenden der Schallwellen wird die Membran aktiv in Schwingung versetzt und nach einer festgelegten Sendedauer wieder zur Ruhe gebracht. Die Laufzeit Δt , bis der reflektierte Schall die

Membran wieder zur Schwingung anregt, wird gemessen. Diese wird zusammen mit der Schallgeschwindigkeit c_s genutzt, um den Abstand D zu bestimmen [31]:

$$D = \frac{c_s}{2} \Delta t. \quad (1)$$

Da die Strecke zwischen Sender und Objekt zweimal durchlaufen wird, muss sie halbiert werden um den tatsächlichen Abstand zu erhalten. Um die Objektposition zu bestimmen, werden zwei Sensoren, deren Erfassungsbereiche überlappen, benötigt. Dieses Verfahren wird Trilaterationsverfahren genannt [35]. Abbildung 1 zeigt den Ansatz für ein rundes Objekt.

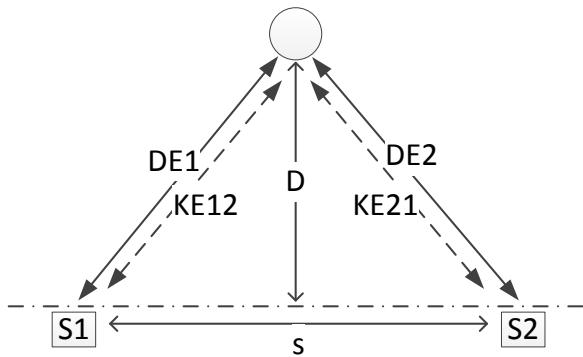


Abbildung 1: Veranschaulichung des Trilaterationsprinzips für ein rundes Objekt

Der Abstand D berechnet sich mittels der Direktechos DE , dem Senderabstand s und des Satzes von Pythagoras:

$$D = \sqrt{DE^2 - \frac{(s^2 + DE^2 - DE^2)^2}{4s^2}} \quad (2)$$

Mit Hilfe des Kreuzechos kann des Weiteren bestimmt werden, ob es sich um ein rundes Objekt handelt oder um eine Wand. Als Kreuzecho wird der Empfang der Schallwellen eines anderen Sensors bezeichnet. Für ein rundes Objekt ergibt sich das Kreuzecho KE zu

$$KE_{rund} = \frac{DE1 + DE2}{2} \quad (3)$$

und für eine Wand zu

$$\text{KE}_{Wand} = \sqrt{\frac{s^2}{4} + \text{DE1} \times \text{DE2}}. \quad (4)$$

Die Reichweite des Ultraschallsensors ist abhängig von der ausgesendeten Schallintensität I_S , die in Abhängigkeit vom Abstand D des gemessenen Objektes abnimmt. Des Weiteren verringern der Reflexionsgrad ρ_S des Objektes und die Impedanz der Atmosphäre die Schallintensität bei der Reflexion. Als untere Grenze zur Objektmessung muss die Schallintensität des Empfangssignals oberhalb des Messrauschens liegen, das heißt es muss $\geq 10\text{dB}$ sein [31].

Ultraschallsensoren besitzen eine geringe Witterungsabhängigkeit. Jedoch reagiert die Membran empfindlich auf Verschmutzung und Eis.

2.2.2 Radar

Die Radarmessung (Radio Detection And Ranging) gehört zu den entfernungsgebenden Messverfahren und wird insbesondere bei anspruchsvollen Umgebungsbedingungen eingesetzt [31]. Bei diesem Verfahren werden elektromagnetische Wellen im Mikrowellenbereich eingesetzt, welche kaum anfällig gegenüber Temperaturschwankungen und Nebel bzw. Regen sind. Für den Automobilbereich sind die Frequenzen 24 GHz und 77 GHz reserviert [35]. Das 24 GHz-Band wird für das Short Range Radar (SRR) genutzt und das 77 GHz-Band für das Long Range Radar (LRR).

Zur Abstands- und Geschwindigkeitsmessung finden zwei verschiedene Ansätze Verwendung, die sich in der Frequenzmodulation unterscheiden: das Dauerstrichradar (Frequency Modulated Continous Wave (FMCW)) und die Chirp Frequency Modulation. Die Frequenzverläufe der beiden Modulationsverfahren sind in Abbildung 2 dargestellt.

Das Dauerstrichradar erzeugt durch die kontinuierliche und rampenförmige Veränderung der Momentanfrequenz mit der Treppensteigung m_ω eine konstante Phasenverschiebung von $+(2D/c_L)^2 m_\omega$. Der Abstand D und die Geschwindigkeit \dot{D} wird bei diesem

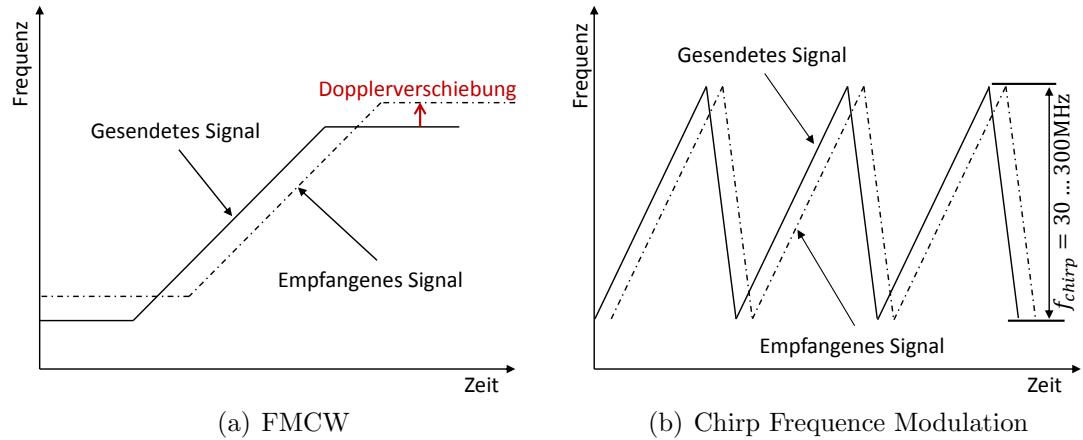


Abbildung 2: Beispielhafter Frequenzverlauf der Signalerzeugung vom Radar [35]

Verfahren mithilfe der Frequenzverschiebung bestimmt:

$$D = \frac{c_L}{2} \cdot \frac{\omega_{obj,1} - \omega_{obj,2}}{m_{\omega,1} - m_{\omega,2}}, \quad (5)$$

$$\dot{D} = \frac{c_L}{2\omega_0} \cdot \frac{m_{\omega,1}\omega_{obj,1} - m_{\omega,2}\omega_{obj,2}}{m_{\omega,1} - m_{\omega,2}}. \quad (6)$$

Bei der Chirp Frequency Modulation wird ein Sägezahnsignal mit einem Hub von $f_{chirp} = 30 \dots 300 \text{ MHz}$ erzeugt. Die Dopplerfrequenz $f_{Doppler}$ bestimmt hierbei die Wiederholrate und sollte etwa 80 kHz betragen, um Mehrdeutigkeiten zu vermeiden. Der Abstand D wird mit dem Puls-Doppler-Verfahren mit der Laufzeit Δt , bezogen auf die Pulsmitte, und der Lichtgeschwindigkeit c_L bestimmt. Für die Geschwindigkeit \dot{D} wird die Dopplerfrequenz $f_{Doppler}$ und die Trägerfrequenz f_0 genutzt.

$$D = \frac{1}{2} c_L \Delta t \quad (7)$$

$$\dot{D} = -\frac{c_L}{2} \frac{f_{Doppler}}{f_0} \quad (8)$$

Der Doppler-Effekt besagt, dass sich die Frequenz bei der Reflexion in Abhängigkeit von der Änderung des Abstandes \dot{D} ändert. Diese Frequenz wird Dopplerfrequenz $f_{Doppler}$ genannt. Beim Annähern ($\dot{D} < 0$) ist diese Frequenz positiv und beim Entfernen negativ.

Die Reichweite des Radars ist abhängig von der Sendeleistung und der Richtcharakteristik der Antenne [35]. Je nach Richtcharakteristik verändert sich der Antennengegenwinn, der Einfluss auf die Reichweite nimmt.

Für die Winkelbestimmung kommen verschiedene Verfahren zum Einsatz. Ein Verfahren ist das mechanische Scanning, bei dem eine Strahlablenkeinheit oder eine Planarantenne mechanisch geschwenkt wird. Dabei rotiert die Radarkeule mit einer Schrittweite von etwa 1° , siehe Abbildung 3(a).

Ein weiteres Verfahren ist das Monopuls-Verfahren. Hierbei erzeugt eine separate Antenne einen Sendestrahl, der von einer Doppelantennen-Anordnung empfangen wird, siehe Abbildung 3(b). Eine Verbesserung dieses Verfahrens wird durch die Verwendung von Mehrstrahlern mit bis zu vier Antennen ermöglicht. Eine Konzeptvariante dieser zwei Verfahren ist das Dual-Sensor-Konzept. Dieses Konzept setzt zwei Sensoren mit fast spiegelbildlich asymmetrischer Antennencharakteristik ein. So sind die Nebenkeulen für den Nahbereich nach außen gerichtet und die Hauptkeulen zeigen parallel in Fahrtrichtung. Dies hat den Nachteil, dass zweimal der gleiche Sensor benötigt wird. Jedoch können diese Kosten ausgeglichen werden, indem weniger Nahbereichssensoren eingesetzt werden müssen.

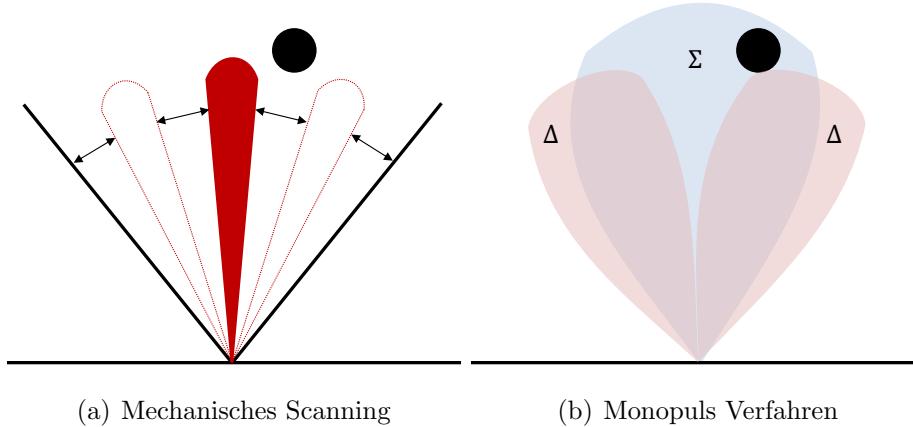


Abbildung 3: Ansätze zur Winkelbestimmung beim Radar [35]

Eine weitere Möglichkeit ist der Einsatz von Planar Antennen Arrays. Mit diesen Arrays kann ein digitaler Scan durchgeführt werden. Hierfür bestehen zwei Ansätze. Ein Ansatz nutzt einen gesteuerten Phasenschieber (ähnlich Phased Array). Ein

anderer speichert den Datenstrom parallel oder seriell zu den Einzelantennen ab und wertet diesen erst in der Nachverarbeitung aus (Digital Beam Forming).

Von diesen vorgestellten Verfahren verwenden die Sensorhersteller vorwiegend Planar Antennen Arrays. Die Firma Hella hingegen setzt das Monopuls-Verfahren zur Winkelmessung ein.

2.2.3 Lidar

Light Detection and Ranging, kurz Lidar, gehört zu den optischen Messverfahren und nutzt Ultraviolett (UV)-, Infrarot (IR)-Strahlen oder Strahlen aus dem sichtbaren Spektrum [35]. Für die Abstandsmessung wird die Pulslaufzeitmessung genutzt, bei dem kurze Lichtblitze hoher Leistung, meist Laser-Pulse, gesendet werden und die Laufzeit Δt gemessen wird [31]. Der Abstand D wird, mit der Lichtgeschwindigkeit c_L , analog zum Ultraschall bestimmt:

$$D = \frac{c_L \Delta t}{2} \quad (9)$$

Die Reichweite beim Lidar ist durch die Lichtintensität, welche den Laserschutzvorschriften genügen muss, beschränkt. Des Weiteren beeinflusst der Reflexionsgrad ρ_L die Reichweite. Dieser ist von der Oberfläche und der Größe des Objektes und vom Einfallwinkel abhängig. Auch die Witterung beeinträchtigt die Reichweite des Lidars, da die Strahlen von Wassertropfen bei Regen und Nebel gebrochen werden.

Das Sichtfeld kann von dem eindimensionalen Fall mit einem Strahl in nur eine Richtung auch horizontal und vertikal beliebig erweitert werden. Dafür gibt es verschiedene Ansätze. Ein Ansatz ist der sogenannte mechanische Scan in Abbildung 4(a) bei dem ein schwenbarer Spiegel eingesetzt wird, der den Laserstrahl umlenkt. Hierdurch ist ein horizontaler Öffnungswinkel von bis zu 360° und ein vertikaler Öffnungswinkel von bis zu 120° möglich. Eine Variante vom Scan ist der „Sweep“, siehe Abbildung 4(b), bei dem ein Bündel von Laserstrahlen geschwenkt wird. Ein weiterer Ansatz nutzt ein Array aus Laserdioden, siehe Abbildung 4(c), die angesteuert werden. Eine Möglichkeit der Ansteuerung ist das Multiplexverfahren, bei dem die Diode nacheinander ansteuert und so ein digitaler Scan durchgeführt

wird. Der horizontale Öffnungswinkel hierbei beträgt bis zu 110° . Der vertikale Öffnungswinkel ist von der Strahlbreite abhängig und beträgt in etwa 2° bis 5° . Bei einer weiteren Variante wird das horizontale Array in der Vertikalen erweitert und die Dioden werden gleichzeitig angesteuert, sodass ein dreidimensionales Abbild der Umwelt erzeugt wird.

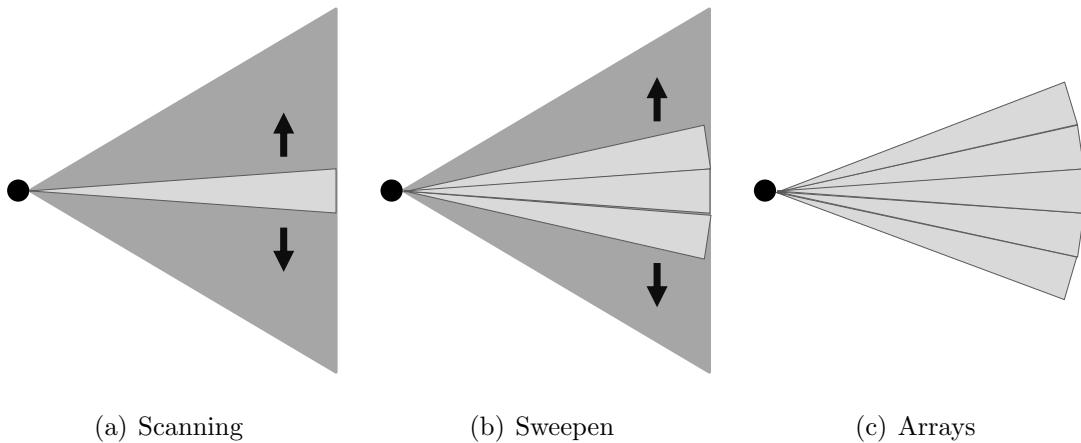


Abbildung 4: Ansätze zur Winkelbestimmung beim Lidar [35]

Neben dem Einsatz von einzelnen Lidarsensoren werden vermehrt Lidarsensoren mit Kameras kombiniert. Diese Sensorkombination wird Photomischdetektor (PMD) genannt. Hierbei wird jedem Bildpunkt der Kamera direkt ein Abstand mit Hilfe des Lidars zugeordnet.

Seitdem vermehrt auch die Mittel- und Kompaktklasse mit Fahrerassistenzsystemen wie z.B. Adaptive Cruise Control (ACC) ausgestattet werden, kommen zunehmend auch Lidar Sensoren zum Einsatz. Diese Entwicklung ist zum Einen der Kostenoptimierung der Sensoren und zum Anderen dem erfolgreichen Einsatz von Lidarsensoren bei der „DARPA Urban Challenge“ zum autonomen Fahren geschuldet [35].

2.2.4 Kamera

Die Kamera gehört zu den bildgebenden Sensoren und hat den Vorteil, ähnliche Informationen wie das menschliche Auge zu produzieren [35]. Somit werden alle relevanten Verkehrsmerkmale aufgenommen und können gut identifiziert werden.

Bildsensoren für den Verkehr müssen je nach Einsatzbereich unterschiedliche Anforderungen erfüllen. Für die Unterscheidung von Rücklichtern und Scheinwerfern und auch anderen Bildelementen sind farbsensitive Systeme erforderlich. Durch die extremen Lichtunterschiede bei Nacht ist außerdem ein hoher Dynamikbereich gefordert. Für die Verkehrszeichenerkennung wird eine hohe Auflösung ($> 15 \text{ Pixel}^{\circ}$) benötigt. Bei Autobahnfahrten ist neben einer kurzen Belichtungszeit ($< 30 \text{ ms}$) ebenfalls diese hohe Auflösung gefordert. Für die Fußgängerdetektion ist hingegen ein breites Sichtfeld wichtig [35].

Der Nachteil beim Einsatz einer Kamera ist die indirekte Abstandsmessung. Bei einer Monokamera kann der Abstand nur anhand der Auflösung geschätzt werden. Aus diesem Grund wird die Kamera häufig mit anderen Sensoren kombiniert wie beispielsweise mit einem Lidar (siehe Abschnitt 2.2.3). Eine weitere Möglichkeit ist der Einsatz von zwei Kameras. Diese Stereokonfiguration erfordert neben einer weiteren Kamera noch zusätzliche Recheneinheiten und eine höhere Rechenleistung. Bei dieser Konfiguration muss außerdem beachtet werden, dass die Module synchronisiert und zueinander in allen Raumachsen stabil montiert sind. Nur so kann eine zeitliche und räumliche Verschiebung der Bilder und eine Dekalibrierung ausgeschlossen werden. Eine rektifizierte Darstellung, d.h. mit eliminierten geometrischen Verzerrungen, der zueinander verdrehten Stereobildebenen ist in Abbildung 5 dargestellt.

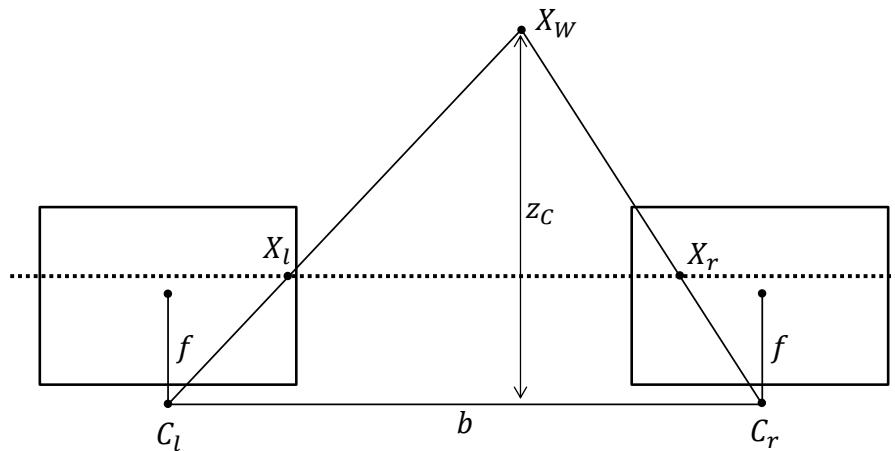


Abbildung 5: Rektifiziertes Stereokamerasystem

Der Abstand z_C zum Punkt X_W in der Realität berechnet sich bei einem Stereosystem mit der Basisbreite b (Abstand der Kameras), der Brennweite f , der Disparität

d (Abstand der Bildpunkte) und der Größe des Bildpunktes s_p auf dem Sensor folgendermaßen:

$$z_C = \frac{b \cdot f}{d \cdot s_p} \quad (10)$$

Neben dem sichtbaren Spektrum wird auch das Infrarotspektrum eingesetzt. Dies ist der unzureichenden Empfindlichkeit bei anspruchsvollen Lichtverhältnissen geschuldet. Hier kommen zwei verschiedene Ansätze zum Einsatz. Dies ist einmal das Ausleuchten der Szene mittels spezieller Scheinwerfer mit infrarotem Licht, das vom Kamerasystem mit Hilfe eines Filters aufgenommen wird. Der zweite Ansatz nutzt Spezialkameras, die für die Wärmestrahlung (Ferninfrarot) von Körpern empfindlich sind. Diese Systeme sind kostenintensiv, da ein spezieller Bildsensor eingesetzt werden muss.

2.3 Datenverarbeitung

Im folgenden Abschnitt wird auf die Datenverarbeitung genauer eingegangen. Sie unterteilt sich in die Objekterkennung und das Objekttracking, welche durch eine Datenfusion erweitert werden können. Der Ablauf der Datenverarbeitung ist in Abbildung 6 schematisch dargestellt.

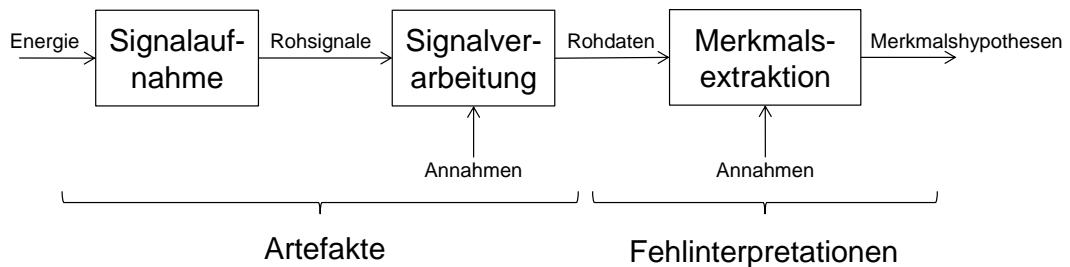


Abbildung 6: Schematischer Ablauf der Datenverarbeitung [35]

Als erstes wird die Signalaufnahme mit dem Sensor durchgeführt. Dem schließt sich eine Signalverarbeitung der Rohsignale an. Danach werden mit Hilfe einer Merkmalsextraktion Merkmals- bzw. Objekthypothesen aufgestellt. Fehlerquellen sind hierbei Artefakte durch Verletzung von physikalischen Annahmen in der Signalverarbeitung und Fehlinterpretationen durch Annahmen in der Merkmalsextraktion.

2.3.1 Objekterkennung

Die Objekterkennung stellt mit Hilfe von Merkmalen Objekthypothesen auf. Die Wahl des Verfahrens ist hierbei maßgeblich abhängig vom Sensorotyp. So werden für Radar und Lidar z.B. Segmentierungsverfahren eingesetzt und für Kamera z.B. Gradientenverfahren.

Radar und Lidar erzeugen bei der Messung Punktwolken. Um in diesen Punktwolken Objekte zu identifizieren, werden Segmentierungsverfahren eingesetzt. Die Annahme bei diesem Verfahren ist, dass Messrohpunkte eines Objektes in enger Nachbarschaft liegen. So werden diese Punkte mittels Region-Growing oder Linienextraktion gruppiert bzw. verbunden, siehe Abbildung 7. Nach diesem Schritt werden die Segmente in I- und L-Formen unterschieden. Unter Verwendung der Segmentmaße kann schließlich die Objektklasse bestimmt werden [22].



Abbildung 7: Beispiel für den Vergleich von Region-Growing (grün) und Linienextraktion (blau). Die roten Punkte sind die Laserscannerrohdaten [22]

Bei der Kamera wird in Einzelbildmerkmale und Korrespondenzmerkmale unterschieden [35]. Erstere werden aus dem Grauwertmuster eines Bildes ermittelt und letztere nutzen die Bildpunkte der Projektion eines Punktes in mehreren Bildern. Um diese zu extrahieren, werden beispielsweise Gradienten- oder Matching Verfahren eingesetzt. Für die Extraktion von Einzelbildmerkmalen wird die Tatsache genutzt, dass sich das Bildsignal an Kanten und Ecken stark ändert. Diese Änderung kann

mathematisch mit Hilfe von Gradienten beschrieben werden. Anschließend können Linienstrukturen aus lokalen Gradientenmaxima mittels Kantendetektoren extrahiert werden (Abbildung 8).



Abbildung 8: Vergleich zwischen Kanten- und Eckendetektor. Links: Originalbild; Rechts: Ergebnisbild eines (a) Kantendetektors; (b) Eckendetektors [35]

Korrespondenzmerkmale werden durch die Projektion eines realen Punktes in mehreren Bildern einer Bildfolge ermittelt. Dies wird entweder mit Gradientenverfahren oder mit Matching Verfahren durchgeführt. Bei ersterem wird die Intensität der Grauwerte als orts-zeitabhängige Funktion mit einer Reihenentwicklung approximiert. Beim Matching Verfahren wird eine kleine Region um einen Bildpunkt herum mit den entsprechenden Punkten im nächsten Bild verglichen, um Korrespondenzen zu finden. Um nicht den gesamten Bildraum abzusuchen, wird das Verfahren auf markante Bildstrukturen wie Ecken und Kanten im Bild beschränkt.

2.3.2 Tracking

Der Objekterkennung schließt sich das Objekttracking an, bei dem die erkannten Objekte verfolgt werden. Das bedeutet, dass die neuen Objekthypothesen mit den vorherigen verglichen und ggf. zugeordnet werden.

Für das Tracking werden insbesondere drei verschiedene Verfahren eingesetzt. Das sind der Bayes-Filter, der Kalman-Filter und der Partikelfilter [35]. Die Aufgabe dieser Verfolgungsverfahren ist, aus den Beobachtungen Y_k die zu schätzenden Größen X_k zu bestimmen. Dies geschieht zu diskreten Zeitschritten $k = 1, 2, \dots$. Die Systemgleichung

$$X_k = f_k(X_{k-1}, s_k) \quad (11)$$

beschreibt die Dynamik des Zustandes X_k . Hierbei wird das stochastische Systemrauschen S mit Hilfe von s_k realisiert. Die erzeugten Beobachtungen Y_k werden mittels der Beobachtungsgleichung

$$Y_k = g_k(X_k, v_k) \quad (12)$$

beschrieben. v_k ist dabei die Realisierung des stochastischen Beobachtungsrauschen V . Mit Hilfe dieser Gleichungen wird die Wahrscheinlichkeitsdichte $p(X_k|Y_0\dots Y_k)$ für den aktuellen Zustand geschätzt.

Der Bayes-Filter ist ein allgemeingültiges Verfolgungsverfahren. Es schätzt aus der Beobachtung die neue mögliche Position. Die Beobachtung findet im Zustandsraum statt und gibt eine Wahrscheinlichkeitsdichte für den aktuellen Zustand heraus unter Berücksichtigung aller vorigen Beobachtungen.

Der Kalman-Filter schätzt die Zustände aufgrund von redundanten Daten. Somit wird zu jedem Zeitpunkt k die Normalverteilung mit Hilfe ihres Mittelwertes \hat{X}_k und der Kovarianzmatrix P_k bestimmt. Die Schätzung aus dem vorigen Schritt \hat{X}_{k-1} , P_{k-1} wird für die nächste Position auf den aktuellen Zeitschritt projiziert. Danach wird schließlich die neueste Beobachtung Y_k mit der Beobachtungsmatrix G und der Kovarianzmatrix des Beobachtungsrauschen P_V berücksichtigt.

Beim Partikelfilter wird die Wahrscheinlichkeitsdichte durch die endliche Summe von Diracstößen mit Gewichten $w_k^i p(X_k|Y_0, \dots, Y_k) \approx \sum w_k^i \delta(X_k - X_k^i)$ approximiert. Die Paare aus Gewicht W_k^i und Zustand X_k^i werden als Partikel betrachtet. Nach jedem Innovationsschritt werden schließlich die Gewichte aktualisiert.

2.3.3 Sensordatenfusion

Die Sensordatenfusion wird genutzt, um die Genauigkeit zu erhöhen bzw. mehr Informationen zu erhalten. Dies ist davon abhängig, welche Sensoren und wie sie eingesetzt werden. Die Sensoren können hierbei komplementär, konkurrierend oder kooperativ verbaut sein. Diese verschiedenen Verbauweisen sind in Abbildung 9 dargestellt. Werden Sensoren komplementär genutzt, so ergänzen sich deren Sichtfelder zu einem großen. Sind Sensoren konkurrierend verbaut, sind sie entweder redundant,

das heißt es wird die gleiche Information generiert, oder konträr, also werden gegensätzliche Informationen erzeugt. Die letzte Variante ist der kooperative Einsatz von unterschiedlichen Sensoren, die zusammen einen höheren Informationsgehalt erzeugen [19].

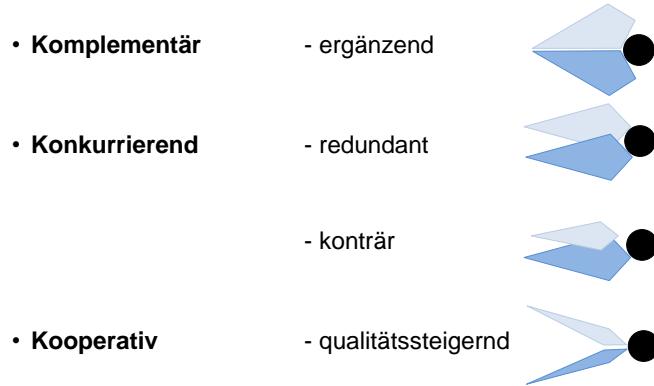


Abbildung 9: Ansätze der Datenaufnahme für die Datenfusion [19]

Für die Sensordatenfusion existieren zwei Ansätze. Entweder werden die Daten implizit oder explizit fusioniert. Bei der expliziten Fusion (Abbildung 10) wird abgewartet, bis alle Messdaten vorliegen und dann erst fusioniert. Somit findet eine zeitliche Filterung in einem festen Zeitraster statt und die Assoziation findet auf einem gemeinsamen Abstraktionslevel statt. Hierbei müssen die Messdaten jedoch synchronisierbar sein.

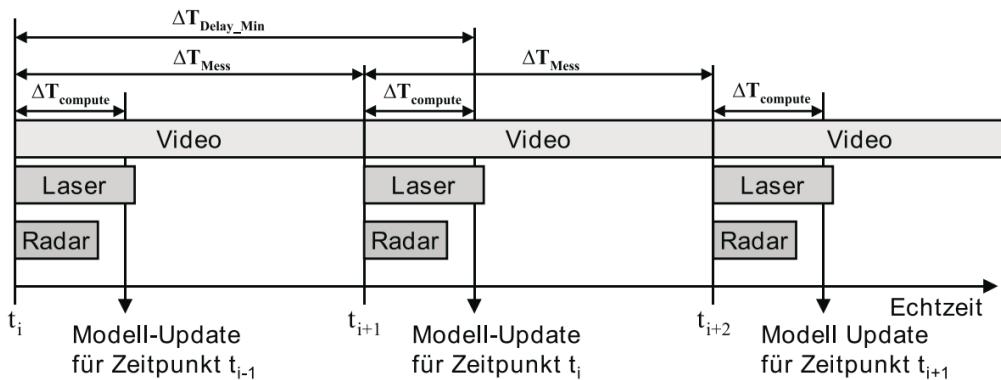


Abbildung 10: Explizite Sensordatenfusion mit synchronen Sensoren [19]

Die Datenfusion mit synchronen Sensoren führt zu einer sicheren und zuverlässigen Assoziation. Da der Sensor mit der längsten Akquisitionszeit den zeitlichen Versatz

zwischen Messung und Assoziation bestimmt, entsteht ein hoher Zeitversatz zwischen Realwelt und Modell $\Delta T_{DelayMin}$. Die Arbeit mit synchronisierten Sensoren bietet neben der sicheren Assoziation eine einfache Erweiterbarkeit um weitere Sensoren, da der Algorithmus deterministisch ist.

Im Gegensatz zur expliziten Fusion werden die Sensordaten bei der impliziten Fusion zeitlich nacheinander eingebracht. Dadurch wird eine zeitlich konsistente Datenverarbeitung nötig. Außerdem muss eine zeitliche Filterung durchgeführt werden, wenn die Messdaten vorliegen. Außerdem wird in der Regel schon eine Assoziation auf dem sensorspezifischen Abstraktionslevel durchgeführt, die bei der Fusion abgeglichen wird. Bei der impliziten Fusion muss keine Synchronisierung der Sensoren durchgeführt werden.

Werden asynchrone Sensoren bei der Datenfusion verwendet, müssen die Daten sequentiell eingebracht werden. Dies bedeutet, dass der Algorithmus nicht deterministisch sein kann, da er dynamisch auf die neuen Daten reagieren muss. Bei diesem Verfahren können Quantisierungsfehler auftreten. Insbesondere wenn die Daten des Sensors mit der kleinsten Latenz kurz nach denen vom Sensor mit der größten Latenz eingebracht werden. Dann können diese Informationen nicht mehr in der Assoziation mitberücksichtigt werden. Je ähnlicher die Latenzzeiten der einzelnen Sensoren sind, desto geringer wird schließlich der Fehler der Schätzung.

3 Anwendungen zur Umfelderfassung

Die in Abschnitt 2.2 vorgestellten Sensoren werden im verkehrstechnischen Kontext für die Automatisierung des Verkehrs genutzt. Das Ziel ist die Mobilität energieeffizient, komfortabel, sicher und verkehrseffizient zu gestalten [6]. Wie sie diesbezüglich in den Fahrzeugen und in der Infrastruktur eingesetzt werden wird in den folgenden Abschnitten erläutert.

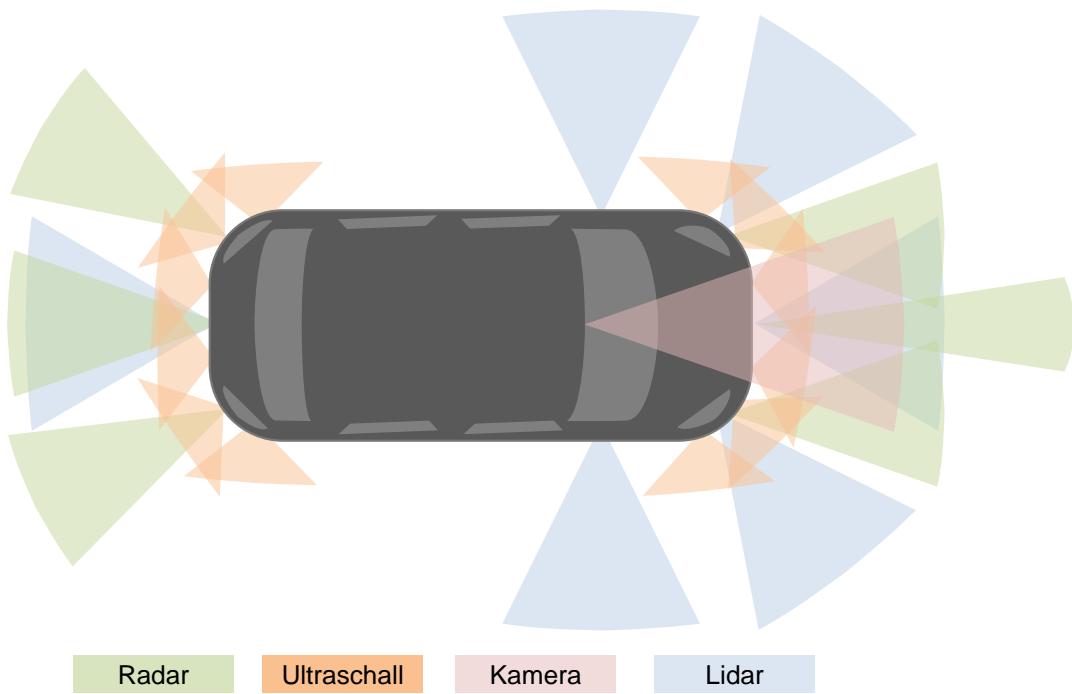
3.1 Im Fahrzeug

Das Ziel des Sensoreinsatzes im Fahrzeug ist die Automatisierung des Fahrzeugs. Um dies zu erreichen, muss das Fahrzeug seine Umgebung vollständig erfassen und bewerten können. Nur so kann es selbstständig ein Manöver auswählen und durchführen. Im Folgenden wird genauer darauf eingegangen, wie weit dies mittlerweile in Serienfahrzeugen umgesetzt wird, und anschließend werden Ansätze aus der Forschung erläutert.

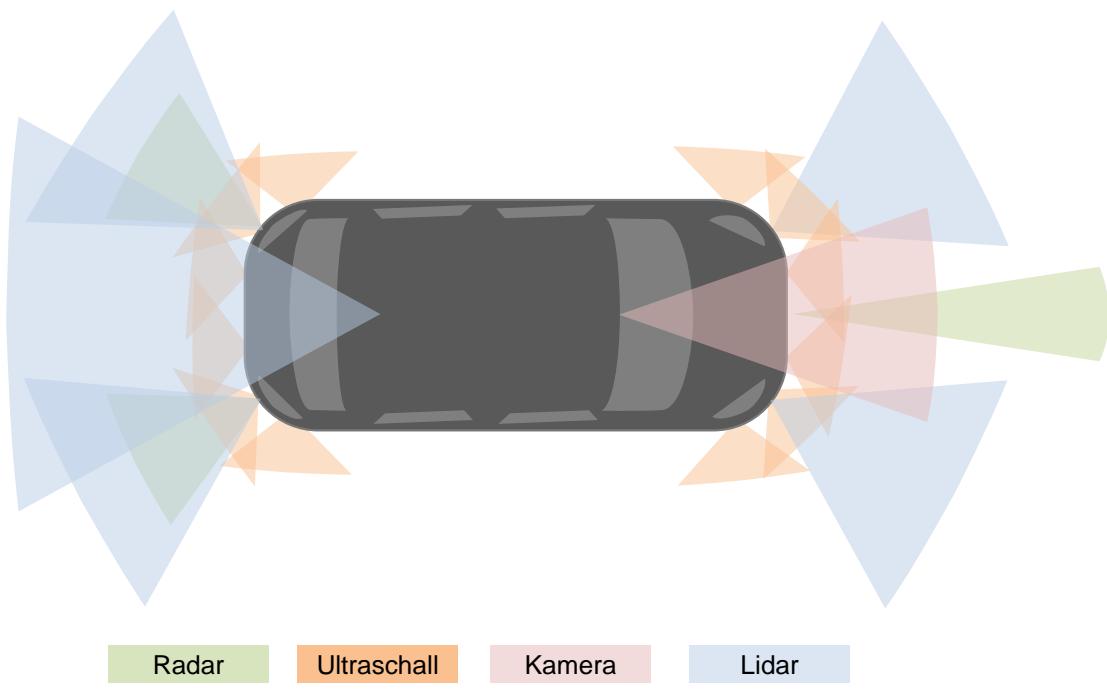
In Abbildung 11 sind die Sensoranordnungen des Fahrerassistenzsystems Car Elektrisch (FASCarE) des DLR und des Testing of Integrated Automation and Monitoring Systems (TIAMO) der TU BS dargestellt. Zu erkennen ist, dass das LRR und das Lidar in Fahrtrichtung genutzt werden. Der Grund dafür liegt in ihrer hohen Reichweite, denn so wird ein großer Sichtbereich in Fahrtrichtung abgedeckt. Sensoren mit einer geringeren Reichweite werden eingesetzt, um das nähere Umfeld zu beobachten. Hierzu gehören das SRR, die Kamera und der Ultraschall.

3.1.1 Teilautomatisierung

Heutzutage werden Serienfahrzeuge mit Sensoren zur Umfelderfassung für die Unterstützung des Fahrers ausgerüstet [35]. Das LRR und das Lidar werden im Rahmen von Fahrerassistenzsystemen z.B. für ein ACC genutzt. Zum Teil werden sie außerdem mit einer Kamera für die Fahrstreifenerkennung kombiniert. So kann der Fahrzeugführer beispielsweise bei einer Autobahnfahrt entlastet werden. Es wird hierbei eine Wunschgeschwindigkeit eingestellt, die bis zu einer Annäherung an ein



(a) FASCarE [13]



(b) TIAMO [32]

Abbildung 11: Zwei verschiedene Fahrzeugkonfigurationen

weiteres Fahrzeug gehalten wird. Mit Hilfe der Fahrstreifenerkennung kann außerdem die Querführung übernommen werden. Die Sensoren für das nähere Umfeld werden unter anderem für Spurwechsel-, Toter-Winkel- und Einparkassistenten genutzt. Die ersten zwei Assistenzsysteme dienen zur Vermeidung von Unfällen mit seitlich von Hinten herannahenden oder kreuzenden Verkehrsteilnehmern. Letzterer Assistent erleichtert das Einparken durch grafische oder akustische Hilfestellungen bis hin zur Übernahme des Einparkvorganges.

3.1.2 Vollautomatisierung

Damit Fahrzeuge ohne menschliches Eingreifen zukünftig fahren können, wird intensiv an der Umfelderfassung geforscht. Eine Auswahl an Arbeiten ist in Tabelle 1 aufgeführt. Zum Einen muss das statische und zum Anderen das dynamische Umfeld erfasst werden. Somit werden Verfahren erforscht, um mittels Radar Fußgänger detektieren zu können [2], [5]. Dies ist aufgrund ihres geringen Querschnittes und der geringen Winkelauflösung des Radars schwierig. In [5] beispielsweise wurde ein Algorithmus entwickelt, der Fußgänger mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% erkennt. Des Weiteren werden Verfahren entwickelt, die Infrarotkameras nutzen [27], [34]. In Letzterer werden Objekte mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% detektiert. Für die Verbesserung der Datenqualität wird auch an der Sensordatenfusion gearbeitet [29], [4].

Für das vollautomatisierte Fahrzeug spielt neben der Umfeldwahrnehmung die Selbstlokalisierung eine wichtige Rolle. Die Selbstlokalisierung wird für den Einsatz von Kartendaten und der Bewertung der Umgebung genutzt. Hierbei werden gemessene Umfeldmerkmale mit Kartenmerkmalen verglichen, um das Fahrzeug zu lokalisieren. Für die Selbstlokalisierung gibt es verschiedene Ansätze mit unterschiedlichen Kombinationen von Umfelderfassungssensoren mit GPS, Beschleunigungs- und Geschwindigkeitssensoren und digitalen Karten. Einige Ansätze sind in [9], [30], [7],[23] und [33] zu finden. In [30] wird eine hochgenaue Karte in Kombination mit einer Kamera, einem Laserscanner und einem GPS Sensor für die landmarkenbasierte Fahrzeugpositionierung genutzt. Als Referenzsystem wurde ein Real-Time Kinematic Inertialnavigationssystem (RTK-GPS) eingesetzt. Die Kamera befindet sich hier hinter der Windschutzscheibe und dient der Fahrspurerkennung. Mit dem Laserscanner auf

Höhe des Kennzeichens sollen Orientierungspunkte detektiert werden. In [23] wird ein anderer Ansatz verfolgt. Hier findet die Positionierung relativ zur Straße statt und nicht mit globalen Koordinaten. Dazu wurde ein Fahrzeug folgendermaßen ausgestattet: GPS Sensor, Gyroskop und Radgeschwindigkeitssensor für Position, Kurs, Geschwindigkeit und Drehgeschwindigkeit; Kamera für Fahrspurerkennung; Radar in Fahrtrichtung für Objekte auf und neben der Straße; RTK-GPS als Referenzsystem.

Ein weiterer Anwendungsfall von Sensoren am Fahrzeug ist die Untersuchung des Verkehrsteilnehmerverhaltens. Einige Vorgehen werden in [10] und [6] vorgestellt. Mit Hilfe dieser Untersuchungen sollen Algorithmen entwickelt werden, die das Verhalten der Verkehrsteilnehmer abschätzen. Dies kann schließlich für die Manöverplanung genutzt werden.

Tabelle 1: Einsatz von Sensoren im Fahrzeug

Quelle	Sensorsetup	Beschreibung	Jahr
[29]	Radar	Sensorfusion für Fahrerassistenzsysteme mit ho-	2009
	Lidar	hen Ansprüchen	
	Kamera		
[28]	Stereokamera	Modell zur Datenanalyse von Stereo Kameras	2010
[2]	2 x Radar	Erkennen eines Menschen mit Radar	2010
[5]	Radar	Erkennen eines Menschen mit Radar	2012
[9]	Lidar GPS	Selbstlokalisierung mit Hilfe von GPS, Laserscanner und digitaler Karte	2013
[37]	Lidar	Positionierung des Lidar, Fahrbahnbegrenzung erkennen, Objekterkennung	2013
[4]	IR	Fusionieren Infrarotkameradaten mit Daten des	2013
	Kamera	sichtbaren Spektrums einer Kamera	
[30]	Kamera	Erzeugen einer Karte mit Hilfe von aktuellen	2013
	Lidar	Messdaten, Selbstlokalisierung des Fahrzeugs	
	GPS		

Einsatz von Sensoren im Fahrzeug

Quelle	Sensorsetup	Beschreibung	Jahr
[7]	Lidar Kamera	Pkw ausgerüstet mit Lidar und Kamera, überlappende Sichtbereiche, autonome Fahrt über 13000km durch Europa und Asien	2013
[23]	GPS Gyroscope Kamera Radar	Pkw ausgestattet mit GPS, Gyroscope, Geschwindigkeitsmesser, Kamera, Radar zur Selbstlokalisierung	2014
[27]	IR	Literaturlistung bzgl. Erkennung von Menschen mit Infrarotsensor	2015
[34]	FIR	Stellt einen Filter zur Objekterkennung mit Infrarot vor	2015
[10]	Lidar	Nutzt digitale Karte und Lidar zur Extraktion von Verkehrsteilnehmern und bestimmt ihr Verhalten	2016
[33]	GPS Gyroscope Kamera	Pkw ausgestattet mit GPS, Gyroscope, Kamera und Laptop zur Selbstlokalisierung	2017

3.2 In der Infrastruktur

In der Infrastruktur werden Umfelderfassungssensoren für die Verkehrsbeobachtung und -steuerung genutzt. Mit den aufgenommenen Daten können Verhaltensweisen von Verkehrsteilnehmern analysiert und unter anderem zur Unfallforschung eingesetzt werden. Außerdem wird der Einfluss der Witterung und der Tageszeit auf das Unfallgeschehen untersucht [16]. Mit Hilfe dieser Daten können schließlich auch Verfahren entwickelt werden, um die Intentionen der Verkehrsteilnehmer vorhersehen zu können. Für die Verkehrssteuerung können mit Hilfe der gesammelten Informationen die Lichtsignalphasen entsprechend des Verkehrsaufkommens dynamisch gesteuert werden [18]. Des Weiteren können diese Informationen auch mittels I2V-Kommunikation an die Fahrzeuge übermittelt werden. Die dynamische Lichtsignalphasensteuerung und die I2V-Kommunikation ermöglichen eine energie- und verkehrseffizientere Routenplanung und eine Reduzierung von Unfällen. Tabelle 2 beinhaltet eine Auswahl von Anwendungen von Sensorkonfigurationen in der Infrastruktur.

3.2.1 Mobile Sensorkonfigurationen

In [3] wird ein transportabler Sensoraufbau für ländliche Kreuzungen ohne Signalanlagen in Minnesota, USA, vorgestellt. Diese Konfiguration ist in Abbildung 12 dargestellt. Bei diesem Projekt wurden Laserscanner und Radar zur Bestimmung der Position und Geschwindigkeit von Objekten eingesetzt. Mit Hilfe dieser Daten können die Abstände zwischen den Objekten bestimmt und anschließend weitergegeben werden. So können Unfälle in Folge von falscher Abstandsschätzung der Fahrer zu reduziert werden.

In [21] wird der Einsatz von unbemannten Luftfahrzeugen (ULF) vorgestellt. Ausgerüstet mit Kamera und evtl. zusätzlich mit Radar können aus der Vogelperspektive Daten für die Verkehrssimulation und Bewertung von Verkehrsnetzen gesammelt werden. ULF stellen so eine zeitsparende Alternative zur Echtzeitbeobachtung dar. Außerdem sind sie mobiler und günstiger als der Einsatz von bemannten Systemen.

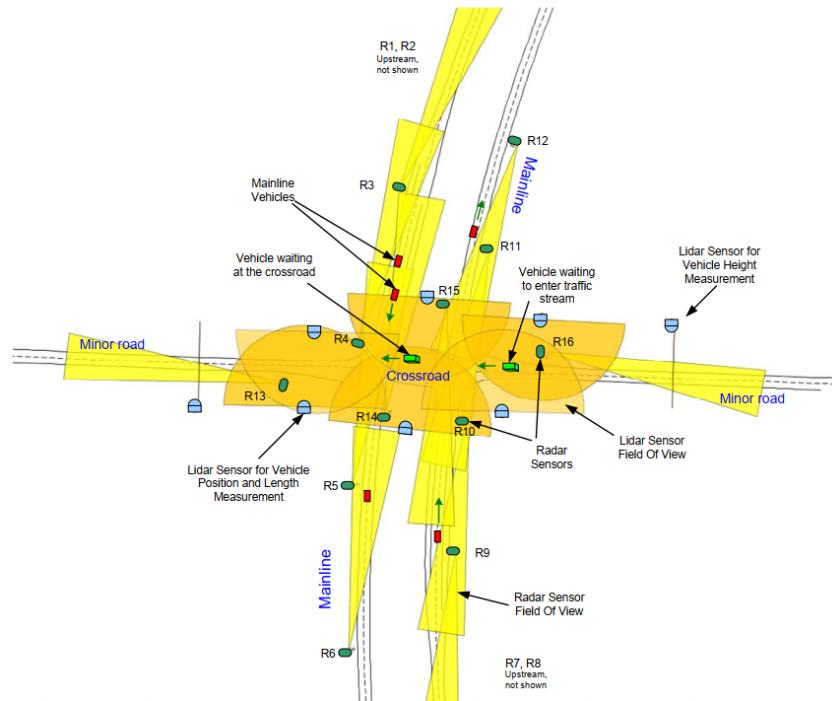


Abbildung 12: Transportabler Sensoraufbau für ländliche Kreuzungen ohne Signalanlagen in Minnesota, USA [3]

3.2.2 Stationäre Sensorkonfigurationen

Beim Ko-PER-Projekt wurde in [25] zunächst eine Kreuzung mit Laserscannern ausgestattet. Die Ergebnisse hieraus wurden bei der Ausstattung einer Kreuzung in Aschaffenburg mit berücksichtigt [26]. Diese wurde mit 14 Laserscannern, 10 Kameras, Signalphasenabgriff und einer I2V Kommunikationseinheit ausgestattet. Die Sensoren befinden sich 5 m über dem Boden und erzeugen so ein Bild in Vogelperspektive. In Abbildung 13 zeigt diesen Aufbau. Mit Hilfe der Laserscanner wird ein 3D-Profil der Szene erstellt. Die Kameras dienen zur verbesserten Klassifikation und Tracking der Objekte. Das Augenmerk dieses Projektes liegt auf der Beobachtung von Fußgängern.

Die Forschungskreuzung in Braunschweig gehört zum Anwendungsplattform Intelligente Mobilität (AIM) [20],[24]. In Abbildung 14 ist die Kreuzung zusammen mit den Sichtfeldern der Sensoren dargestellt. Die blauen Kegel symbolisieren die Sichtbereiche von zwei Monokameras in Kombination mit einem IR-Blitz und einem 24 GHz

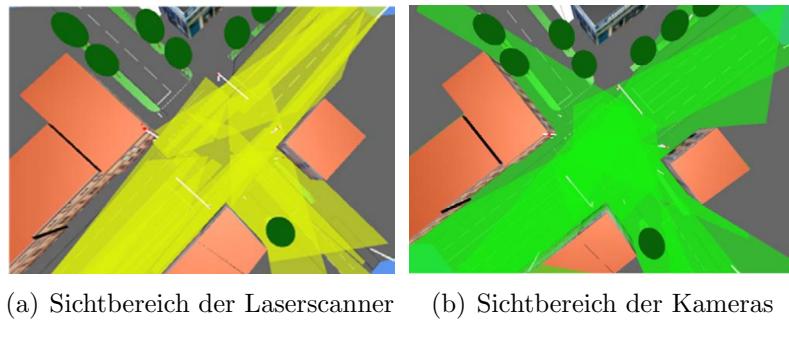


Abbildung 13: Sensoaraufbau der Ko-PER Kreuzung in Aschaffenburg [26]

Radar. In grün sind die Sichtbereiche von Stereokamerasystemen dargestellt. Auf Basis dieser Sensorkonfiguration sollen zum Einen Prozesse und Interaktionen von Verkehrsteilnehmern untersucht werden und zum Anderen sollen die Daten für das kooperative Fahren und die Automatisierung des Verkehrs genutzt werden.

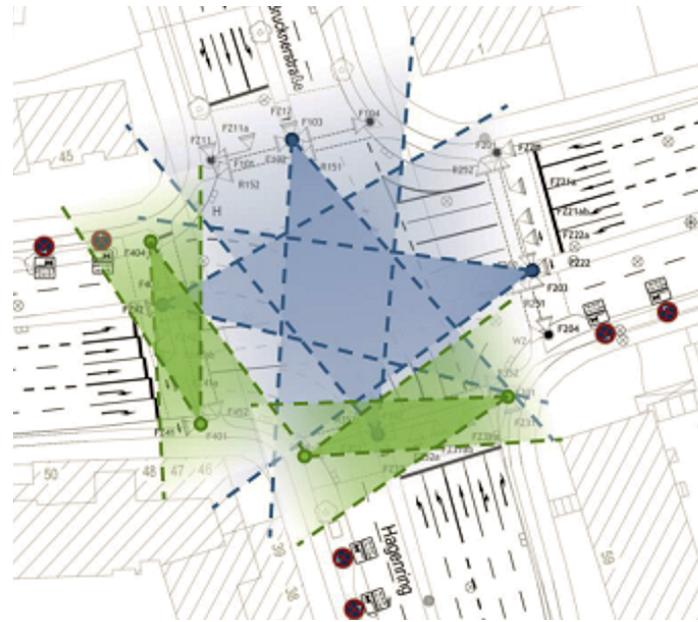


Abbildung 14: Sensorkonfiguration der Forschungskreuzung in Braunschweig. Blau: Sichtfeld zweier Monokameras, kombiniert mit einem 24 GHz Radar und einem IR-Blitz. Grün: Sichtfeld eines Stereokamerasystems mit einem IR-Blitz [6]

Tabelle 2: Einsatz von Sensoren in der Infrastruktur

Quelle	Sensorsetup	Beschreibung	Jahr
[3]	Radar	Verkehrsüberwachung an Kreuzung mit Radar	2006
	Lidar	und Lidar	
[16]	Kamera	Kamera, Laserscanner, IR zur Verkehrs- und	2009
	Lidar	Umweltbeobachtung (Bestimmung der Witte- rung, Tageszeit)	
	IR		
[25]	Lidar	Einsatz und Modellierung von Laserscannern an Kreuzungen	2012
[26]	Lidar	Beschreibt den Versuchsaufbau an einer Kreu- zung zur Beobachtung des Verkehrs	2012
	Kamera		
[15]	Kamera	Vergleicht Algorithmen zur Verhaltenserken- nung von Verkehrsobjekten in Kameradaten	2012
[21]	Kamera	Überblick von verschiedenen Studien, die ULF	2013
	Radar	zur Verkehrsüberwachung nutzen. Ausgestattet mit Kamera/Radar	
[17]	Kamera	Stellt einen Algorithmus zum Objekttracking für die Bildverarbeitung vor, der an unterschied- lichen Kreuzungen getestet wurde	2014
[8]	Kamera	Listet und diskutiert Ansätze zur Verkehrsbe- obachtung an Kreuzungen	2016
[20]	Kamera	Stellt die AIM zur Untersuchung des Verkehrs	2016
	IR	vor	
	Radar		
[24]	Kamera	Untersuchung von Konflikten zwischen Fahrrad- fahrern und motorisierten Fahrzeugen	2017
	IR		
	Radar		
[18]	Radar	Stellt 76-81GHz Radar zur Ver- kehrsüberwachung vor	2018

4 Anforderungen an das Simulations-Tool

Kapitel 3 stellte einige bestehende Sensorkonfigurationen für Fahrzeuge und der Infrastruktur vor. Für die Analyse dieser Konfigurationen und Auslegung zukünftiger Sensorkonzepte soll ein Simulations-Tool erstellt werden. Dafür werden im folgenden Kapitel Anforderungen an ein entsprechendes Tool ausgearbeitet. Eine Auflistung der Anforderungen schließt das Kapitel ab.

4.1 Komponenten des Simulations-Tools

Für die Analyse von Sensorkonfigurationen müssen neben den zu bewertenden Sensoren auch die Umgebung und die Objekte, d.h. die Verkehrsteilnehmer, abgebildet werden. Die Abhängigkeiten dieser drei Komponenten sind in Abbildung 15 dargestellt. Die grünen Pfeile geben an, dass die Sensoren in der Umgebung und an den Objekten positioniert werden. Außerdem sind die Objekte in der Umgebung platziert. Der Einfluss der Umgebung und der Objekte auf die Sensoren ist durch die roten Pfeile dargestellt.

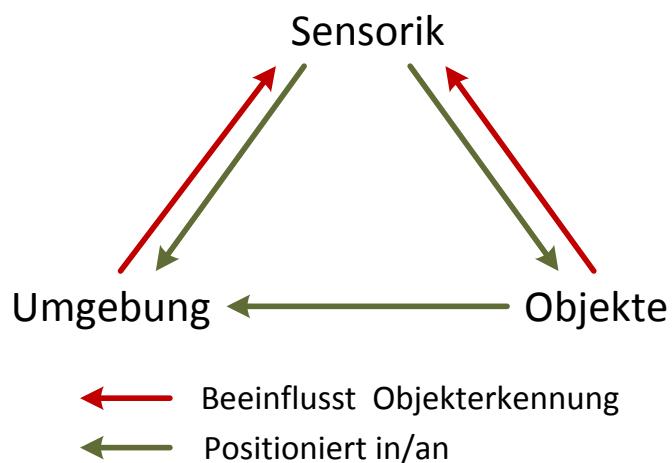


Abbildung 15: Komponenten des Simulations-Tools

4.1.1 Sensoren

Wie schon in Kapitel 2 dargestellt, existieren verschiedene Sensortypen zur Umfeldfassung. Die Eigenschaften dieser Typen müssen für das Tool modelliert werden. Wesentliche Merkmale sind das Sichtfeld, bestehend aus horizontalem und vertikalem Öffnungswinkel ϕ und der Reichweite R_{max} , und die Latenz und die Genauigkeit der Messung. Des Weiteren müssen die Einflüsse auf die Messung, wie die Witterung und die Lichtverhältnisse, berücksichtigt werden.

Für die Bewertung von Sensorkonfigurationen muss dem Benutzer ermöglicht werden, zwischen verschiedenen Sensoren zu wählen. Diese muss er außerdem an den Objekten und in der Umgebung positionieren und ausrichten können. Des Weiteren sollte ihm ermöglicht werden, individuelle Parameter wie die Latenz der Datenauswertung oder die Objekterkennungswahrscheinlichkeit seines Objekterkennungsalgorithmus anzugeben.

4.1.2 Objekte

Die Verkehrsteilnehmer werden in der Verkehrstechnik als Objekte bezeichnet. Sie werden in folgende Typen unterschieden: Pkw, Lkw, motorisierte und unmotorisierte Zweiräder und Fußgänger.

Für den automatisierten Verkehr muss, wie schon in Abschnitt 3.1 angeführt, das statische und dynamische Umfeld erfasst werden. Mit Hilfe des Simulations-Tools soll überprüft werden können, wo und wie gut die Objekte erfasst werden. Dafür muss das Tool alle relevanten Eigenschaften der Objekte abbilden. Dazu zählen die Größe, die Bewegungsrichtung und die Geschwindigkeit.

Zur Analyse muss der Benutzer Objekte in einer Szene platzieren können. Außerdem sollte er den Objekttyp auswählen und die Bewegungsrichtung sowie die Geschwindigkeit bestimmen können.

4.1.3 Umgebung

Zur Erzeugung von Use-Cases wird eine Auswahl von verschiedenen Straßenführungen benötigt. Dazu gehören verschiedene Kreuzungs- und Straßentypen ausgestattet, mit Verkehrsschildern und/oder Lichtsignalanlagen. Darüber hinaus sollte dem Benutzer ermöglicht werden, reale Kartendaten zu laden. Damit wäre es möglich, bestimmte Verkehrsknotenpunkte oder auch ganze Städte im Bezug auf Sensorkonfigurationen zu analysieren.

Weitere Umgebungsbestandteile, die für das Tool modelliert werden müssen, sind sicht einschränkende Elemente wie Häuser und Bäume. Auch die Tageszeit bzw. die Lichtverhältnisse und die Witterung müssen modelliert werden, um deren Einfluss auf die Sensoren berücksichtigen zu können. Dafür sollte dem Benutzer ermöglicht werden, diese einzustellen.

4.1.4 Auswertung

Mit Hilfe der modellierten Eigenschaften der Sensoren, der Objekte und der Umgebung können Use-Cases ausgewertet werden. Dafür muss zunächst bestimmt werden, welche Objekte sich innerhalb des Sensorsichtfeldes befinden. Unter Berücksichtigung der Einflüsse muss daraufhin ermittelt werden mit welcher Wahrscheinlichkeit jedes Objekt erkannt wird. Des Weiteren muss die Latenz und Genauigkeit der Erkennung bestimmt werden. Diese Werte müssen schließlich an den Benutzer ausgegeben werden.

Da in der Regel mehr als ein Sensor an einem Objekt bzw. an der Infrastruktur verbaut wird, muss bei der Auswertung der Objekterkennung auch die Sensordatenumfusion berücksichtigt werden. Zusätzlich können die Daten per C2X-Kommunikation weitergeleitet werden, was ebenfalls die Werte der Objekterkennung beeinflusst.

Neben der statischen Auswertung einzelner Momentaufnahmen sollte des Weiteren eine zeitliche Auswertung möglich sein. Dadurch können schließlich auch zeitliche Abhängigkeiten berücksichtigt werden.

Für das bessere Verständnis des Benutzers sollte die Szene außerdem grafisch dargestellt werden. Hierbei sollte die Option bestehen einzelne Szenenelemente zu

vergrößern. So können Städte und Knotenpunkte im Ganzen oder Konfliktszenen im Detail betrachtet werden.

Abschließend muss der Benutzer die erzeugte Szene speichern und laden können. Dadurch kann eine Reproduzierbarkeit gewährleistet werden.

4.2 Anforderungsliste

Aus den zuvor erarbeiteten Punkten kann schließlich eine Anforderungsliste erstellt werden. Dabei können die Anforderungen in die vier Komponenten „Sensoren“, „Objekte“, „Umgebung“ und „Auswertung“ eingeteilt werden. In Tabelle 3 befindet sich diese Auflistung.

Tabelle 3: Anforderungen an die Implementierung

Nr	Anforderung
S	Sensoren
S1	Verschiedene Sensortypen müssen gewählt werden können
S2	Das Sichtfeld der Sensoren muss gewählt werden können
S3	Sensoren müssen positioniert werden können
S4	Sensoren müssen ausgerichtet werden können
S5	Der Einfluss der Witterung auf die Messung muss berücksichtigt werden
S6	Der Einfluss der Lichtverhältnisse auf die Messung muss berücksichtigt werden
O	Objekte
O1	Objekte müssen platziert werden können
O2	Verschiedene Objekttypen müssen den Objekten zugeordnet werden können
O3	Jedem Objekt muss eine Bewegungsrichtung zugeordnet werden können
O4	Jedem Objekt muss eine Geschwindigkeit zugeordnet werden können
U	Umgebung
U1	Eine Straßenführung muss ausgewählt werden können
U2	Infrastrukturelemente müssen eingefügt werden können
U3	Die Witterung muss gewählt werden können

Anforderungen an die Implementierung

Nr	Anforderung
U4	Die Tageszeit muss gewählt werden können
A	Auswertung
A1	Objekte im Sichtfeld müssen erkannt werden
A2	Die Erkennungswahrscheinlichkeit des Objekterkennungsalgorithmus muss gewählt werden können
A3	Der Abstand zum Objekt muss bestimmt werden
A4	Der Abstand muss die Objekterkennung beeinflussen
A5	Die Objekterkennungswahrscheinlichkeit muss bestimmt werden
A6	Die Objekterkennungswahrscheinlichkeit muss ausgegeben werden
A7	Die Geschwindigkeit des Objektes muss bestimmt werden können
A8	Die Genauigkeit der Messung muss ausgegeben werden
A9	Die Sensorfusion muss berücksichtigt werden
A10	Die ermittelte Objektposition soll ausgegeben werden
A11	Die Latenz der Messung muss berücksichtigt werden
A12	Die Latenz der Datenverarbeitung muss berücksichtigt werden
A13	Die Latenz, bis das Objekt erkannt ist, muss ausgegeben werden
A14	Eine zeitliche Auswertung muss möglich sein
A15	Die Szene muss grafisch dargestellt werden können
A16	Es muss die Möglichkeit des Zoomens bestehen
A17	Die Szene muss gespeichert werden können
A18	Szenen müssen geladen werden können

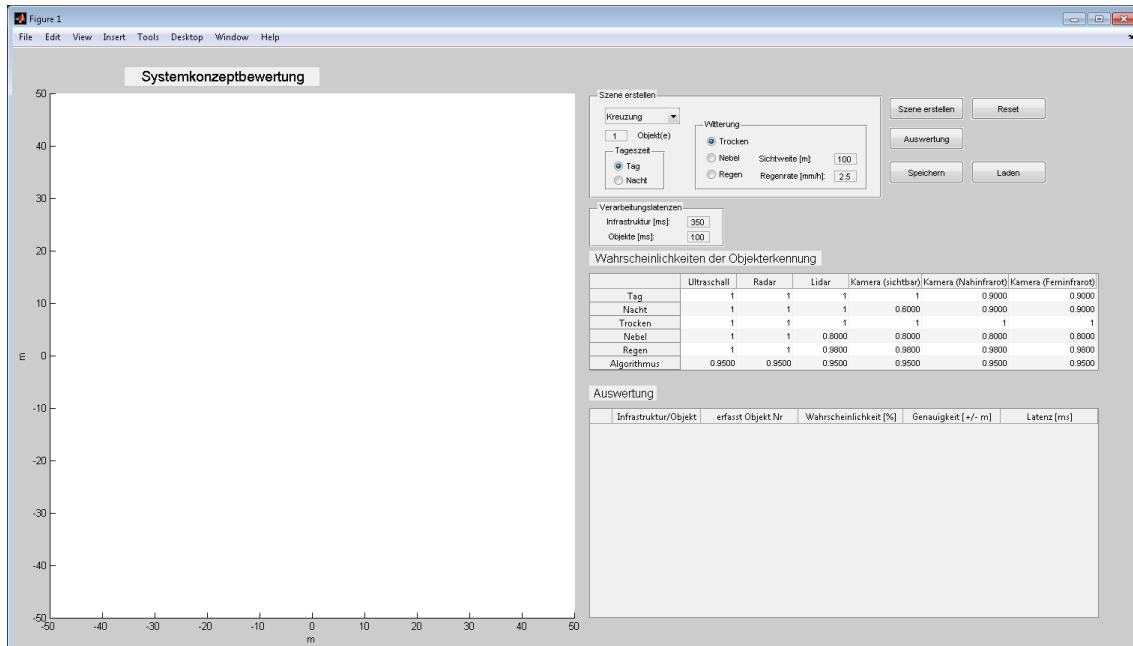
5 Simulations-Tool

Nachdem in Kapitel 4 die Anforderungen spezifiziert worden sind, wird im folgenden Kapitel die Umsetzung dieser Anforderungen in Matlab vorgestellt. Zunächst werden hierfür die Benutzeroberfläche und der Programmablauf erläutert. Anschließend wird genauer auf die Implementierung der Funktionen eingegangen.

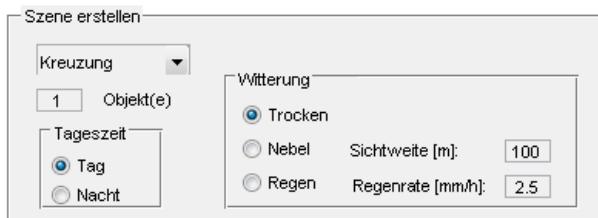
5.1 Benutzeroberfläche

Abbildung 16(a) zeigt die grafische Benutzeroberfläche des Programms. In der linken Hälfte des Fensters wird die Szene visualisiert. Die Parameter hierfür definiert der Benutzer mit dem Panel „Szene erstellen“ rechts oben im Fenster (vgl. Abbildung 16(b)). Ein Dropdown-Menu ermöglicht die Auswahl der Straßenführung (U1). Darunter wird die Anzahl der zu platzierenden Objekte in einem Eingabefeld angegeben. Die Auswahl der Tageszeit wird durch die Radiobuttons Tag und Nacht, die darunter platziert sind, realisiert (U4). Die Standardeinstellung ist „Tag“. Auf der rechten Seite des Panels „Szene erstellen“ besteht die Möglichkeit, die Witterung zu verändern (U3). Hierfür kann der Benutzer zunächst zwischen „Trocken“, „Nebel“ und „Regen“ wählen. Bei Nebel muss der Benutzer noch eine Sichtweite im nebenstehenden Eingabefeld eintragen. Der Standardwert ist 100 m. Wenn Regen ausgewählt ist, benötigt das Programm eine Regenrate, die im Eingabefeld neben „Regen“ angegeben wird. Als Voreinstellung wird eine Regenrate von 2.5 mm/h angenommen.

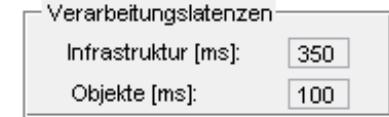
Rechts neben dem Panel „Szene erstellen“ sind fünf Buttons: „Szene erstellen“, „Reset“, „Auswertung“, „Speichern“, „Laden“. Mit ersterem wird in der linken Bildhälfte schließlich die Szene gezeichnet (A15). Mit dem „Reset“-Button wird das Programm wieder auf die Standardeinstellungen zurückgestellt. Nachdem die Szene erstellt worden ist, kann mit dem Button „Auswertung“ die Szene ausgewertet werden. Daraufhin wird die Objekterkennung durchgeführt und unten rechts die Tabelle gefüllt (A6, A8, A13). Mit dem Button „Speichern“ werden alle Variablen gespeichert (A17). Diese können mit dem Button „Laden“ zu einem späteren Zeitpunkt wieder aufgerufen werden (A18).



(a) Gesamtansicht der Benutzeroberfläche



(b) Panel: Szene erstellen



(c) Panel: Verarbeitungslatenzen

	Ultraschall	Radar	Lidar	Kamera (sichtbar)	Kamera (Nahinfrarot)	Kamera (Ferninfrarot)
Tag	1	1	1	1	0.9000	0.9000
Nacht	1	1	1	0.6000	0.9000	0.9000
Trocken	1	1	1	1	1	1
Nebel	1	1	0.8000	0.8000	0.8000	0.8000
Regen	1	1	0.9800	0.9800	0.9800	0.9800
Algorithmus	0.9500	0.9500	0.9500	0.9500	0.9500	0.9500

(d) Tabelle mit Wahrscheinlichkeiten für die Einflüsse der Objekterkennung

Abbildung 16: Grafische Benutzeroberfläche des Software-Tools

Unter dem Panel „Szene erstellen“ sind Eingabefelder für die Angabe von Werten für die Verarbeitungslatenzen der Objekte und der Infrastruktur (A12), siehe Abbildung 16(c). Für die Infrastruktur ist standardmäßig 350 ms und für die Objektlatenz 100 ms eingetragen. In der Tabelle darunter sind die sensorspezifischen Wahrscheinlichkeiten der Objekterkennung aufgelistet, siehe Abbildung 16(d). Die Einträge der Tabelle kann der Benutzer anpassen (S5, S6, A2).

5.2 Programmablauf

Der Programmablauf ist in Abbildung 17 als Flussdiagramm dargestellt. Mit Programmstart wird die Benutzeroberfläche geöffnet. Jetzt kann der Benutzer die Szene mit Hilfe des Panels „Szene erstellen“ definieren. Nach Betätigen des Buttons „Szene erstellen“ wird die Straßenführung in der linken Fensterhälfte gezeichnet (A15).

Wenn Infrastrukturelemente in der ausgewählten Straßenführung vorhanden sind (U2), wird der Benutzer zunächst aufgefordert, diese mit Sensorik auszustatten. Hierfür wird nacheinander für jedes Element zunächst die Sensoranzahl abgefragt und der Benutzer wird aufgefordert, einen Sensor auszuwählen (S.1, S.2) und dessen Position (S3) und Ausrichtung (S4) am aktuellen Infrastrukturelement anzugeben. Wenn keine Infrastrukturelemente in der ausgewählten Straßenführung existieren, können keine Infrastruktursensoren platziert werden.

Anschließend wird der Benutzer aufgefordert, die Objekte zu platzieren (O1). Dies geschieht per Mausklick innerhalb der Straßenführung. Danach kann der Benutzer den Objekttyp auswählen (O2), der schließlich in der Szene gezeichnet wird. Hiernach wird der Benutzer im Falle eines Fahrzeugs gefragt, mit wie vielen Sensoren das Objekt ausgestattet werden soll. Analog zu Infrastrukturausstattung wird der Benutzer nun aufgefordert, einen Sensor auszuwählen (S1, S2) und dessen Position (S3) und Ausrichtung (S4) am Objekt anzugeben.

Nachdem die Szene komplett erzeugt worden ist, kann diese ausgewertet werden. Hierfür muss der Benutzer den Button „Auswertung“ betätigen. Dann wird die Objekterkennung durchgeführt und die Wahrscheinlichkeit (A5), die Genauigkeit und die Latenz ermittelt. Diese Werte werden schließlich in der Tabelle unten rechts

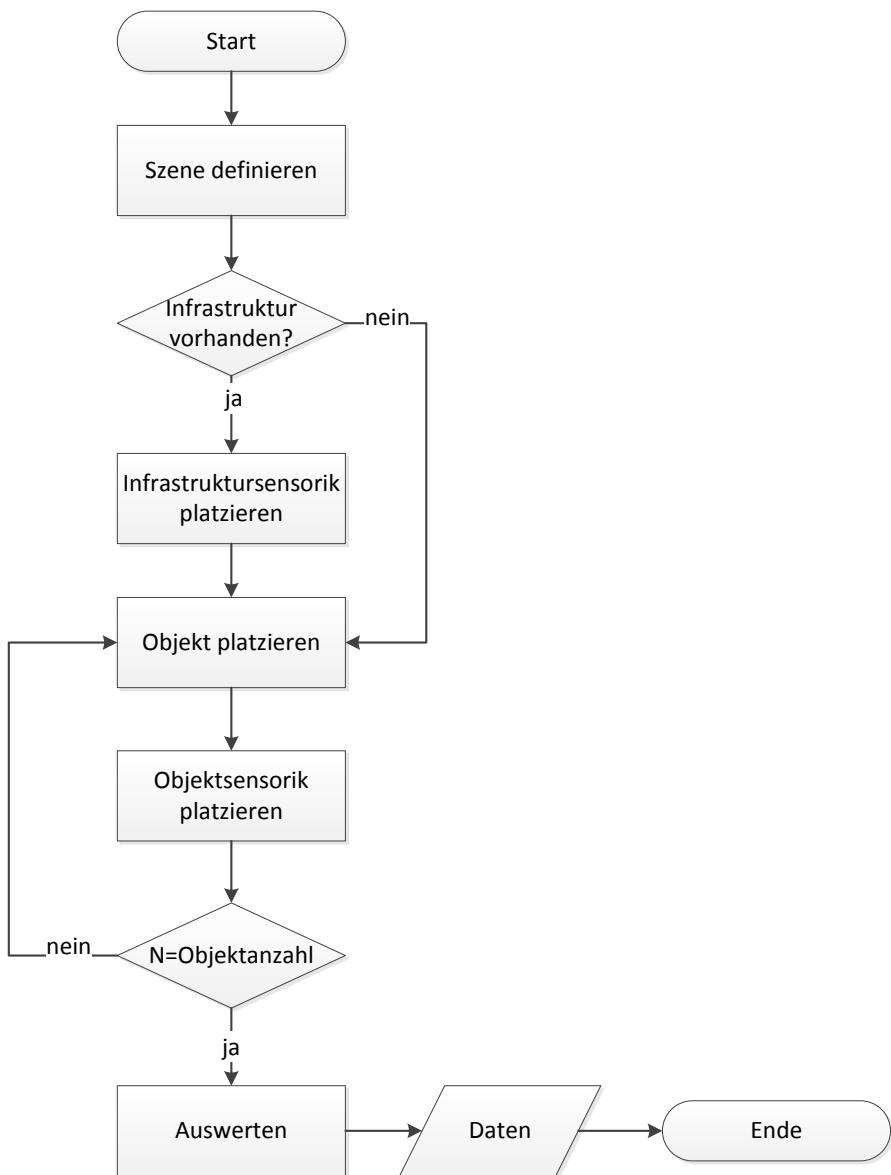


Abbildung 17: Flussdiagramm des Programmablaufs

im Fenster ausgegeben (A6, A8, A13). Des Weiteren werden alle erkannten Objekte in der Szene mit einem Kreuz versehen.

5.3 Implementierung

5.3.1 Umgebung

Der Ablauf der Umgebungserzeugung ist als Flussdiagramm in Abbildung 18 dargestellt. Wie schon in Abschnitt 5.1 beschrieben, kann der Benutzer per Dropdown-Menu eine Straßenführung auswählen (U1). Im Rahmen dieser Arbeit sind drei Straßenführungen implementiert worden. Dies sind eine einfache Kreuzung ohne Infrastrukturelemente, eine Kreuzung mit Mittelstreifen und vier Infrastrukturelemente und die Möglichkeit, eine Karte der Braunschweiger Forschungskreuzung zu laden. In letzterer werden acht Infrastrukturelemente gezeichnet. Abbildung 19 zeigt die Visualisierung dieser drei Möglichkeiten im Tool. Alle drei Optionen zeigen einen Ausschnitt von 50 m von der Kreuzungsmitte in jede Richtung. Bei den ersten beiden Varianten wird von einer Spurbreite von 3 m ausgegangen.

Je nachdem, welche Straßenführung gewählt wird, nimmt das Programm einen anderen Pfad. Bei der einfachen Kreuzung können nach dem Zeichnen die Objekte platziert werden. Nach dem zeichnen der Kreuzung mit Infrastruktur können die Infrastrukturelemente mit Sensorik ausgestattet werden. Danach oder wenn dies nicht gewünscht ist, können die Objekte platziert werden. Bei der Forschungskreuzung werden zunächst die TIF- und TFW-Dateien geladen. Mit Hilfe der Daten aus dem World file (TFW) und den Bildpunkten werden die Koordinaten umgerechnet. Anschließend können ebenfalls erst die Sensoren platziert werden oder direkt zur Objektplatzierung weiter gegangen werden.

Neben der Straßenführung können die Umwelteinflüsse Tageszeit und Witterung bestimmt werden (U7, U8). Bei der Tageszeit wird die Variable „Tag“, bei der Auswahl „Tag“, auf „true“ oder, bei der Auswahl „Nacht“, auf „false“ gesetzt. Die Auswahl der Witterung geschieht analog zur Tageszeit. Für die Witterung wird die Variable „Trocken“ oder „Nebel“ oder „Regen“ auf „true“ und alle anderen auf „false“ gesetzt. Dies kann vor oder nach der visuellen Erzeugung der Szene ausgewählt

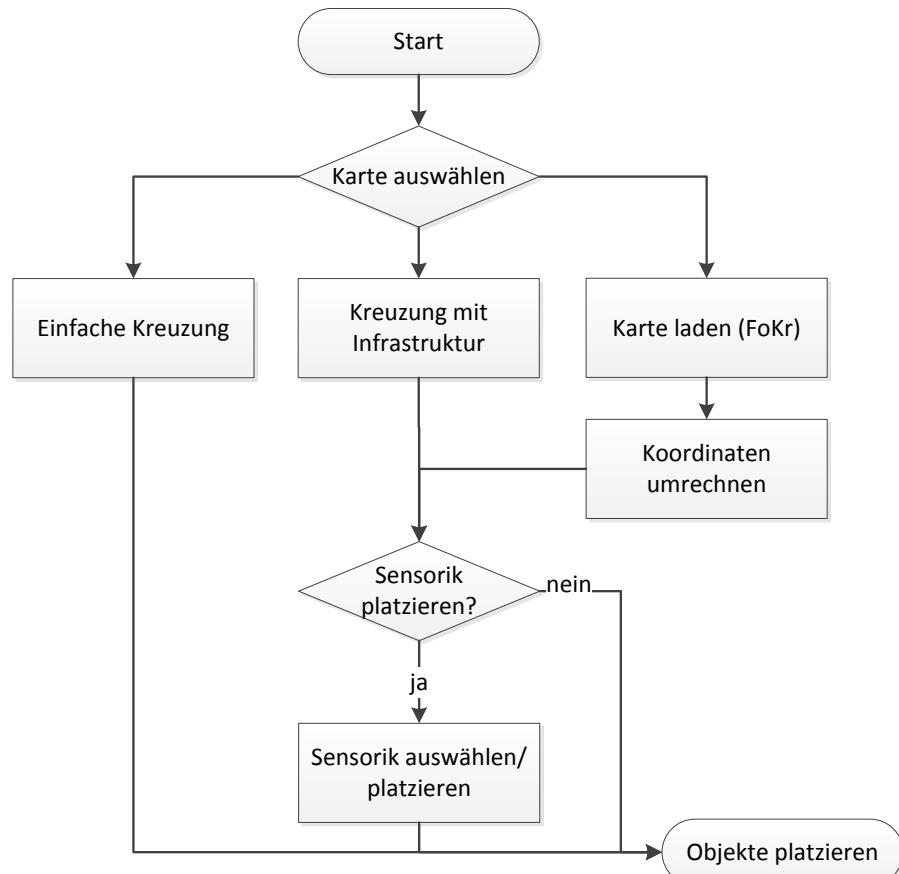


Abbildung 18: Flussdiagramm der Umgebungserzeugung

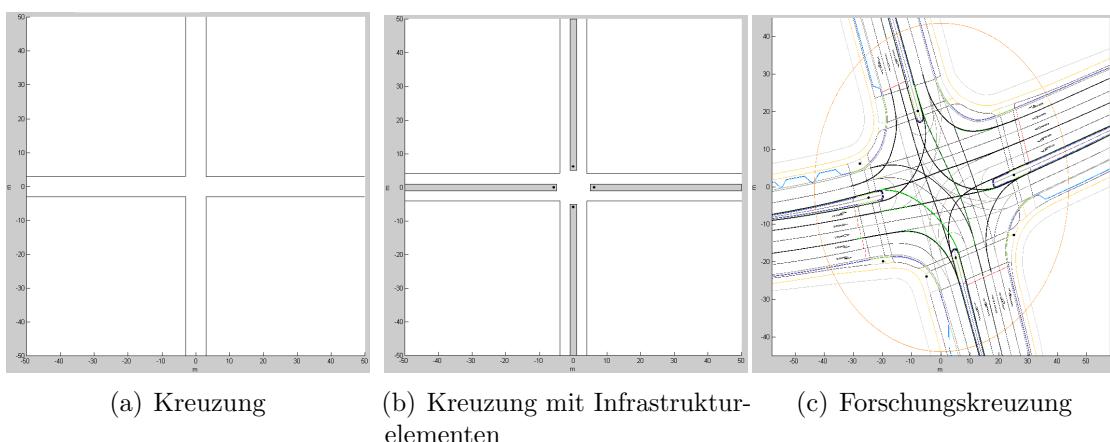


Abbildung 19: Auswählbare Straßenführungen

werden. Wie diese Einflüsse die Objekterkennung der Sensorik beeinflusst, kann in der Tabelle definiert werden.

5.3.2 Objekte

Die einzelnen Schritte der Objektplatzierung sind in Abbildung 20 dargestellt. Solange die Objektanzahl (ObjAnzahl) nicht erreicht worden ist, werden die Schritte ausgeführt. Zunächst wird die Objektposition per Mausklick in der Karte bestimmt (O1). Danach wird der Benutzer aufgefordert einen Objekttypen zu wählen (O2). Bei den ersten beiden Straßenführungen wird im Falle eines Fahrzeugs die Fahrtrichtung der Fahrspur erkannt und der horizontale Ausrichtungswinkel entsprechend gesetzt (O3). Bei Fußgängern und der Forschungskreuzung muss dieser vom Benutzer angegeben werden, da die Extraktion der einzelnen Fahrspuren aus der Bilddatei zu rechenintensiv für die Anwendung ist.

Entsprechend des Objekttyps werden danach Breite B , Länge L und Höhe H des Objektes auf die Werte aus Tabelle 4 gesetzt. Mit der Position, dem Ausrichtungswinkel und den Größenangaben werden schließlich die Objektecken mit einer homogenen Koordinatentransformation berechnet [11]:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 & x_0 \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 & y_0 \\ 0 & 0 & 1 & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \pm \frac{L}{2} \\ \pm \frac{B}{2} \\ H \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Tabelle 4: Grundmaße von Verkehrsteilnehmern in [m] [36]

	PKW	LKW	Fußgänger
Breite	1.75	2.55	0.55
Länge	4.7	14	0.3
Höhe	1.7	4	2

Unter Verwendung dieser Eckpunkte wird daraufhin das Objekt als Polygon gezeichnet. Wenn es sich nicht um einen Fußgänger handelt, wird der Benutzer aufgefordert,

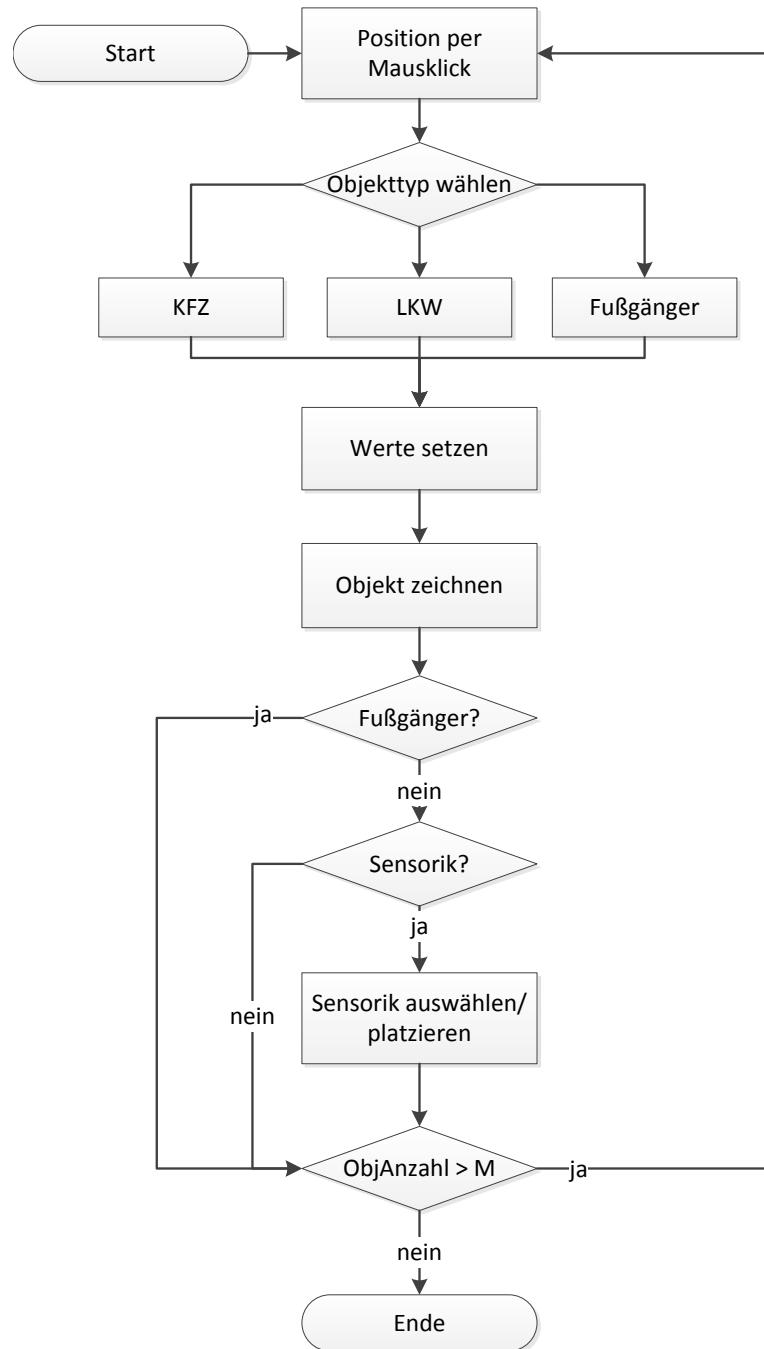


Abbildung 20: Flussdiagramm der Objekterzeugung

eine Sensoranzahl anzugeben. Ist die Anzahl > 0 , wird das Objekt mit Sensorik ausgestattet. Im Falle eines Fußgängers oder einer Sensoranzahl = 0 wird dieser Schritt übersprungen.

5.3.3 Sensoren

Der Ablauf für die Erzeugung der Sensoren ist in Abbildung 21 dargestellt. Als Erstes wird eine Liste mit Sensoren und deren Spezifikationen geladen (siehe Tabelle 10 im Anhang). Diese Liste wurde aus Datenblättern und anderen Quellen zusammengestellt. Aufgrund der Unterschiede in der Angabe der Spezifikationen sind fehlende Werte durch die typabhängige Bestimmung eines Mittelwertes aus den gegebenen Werten anderer Datenblätter nachgetragen worden.

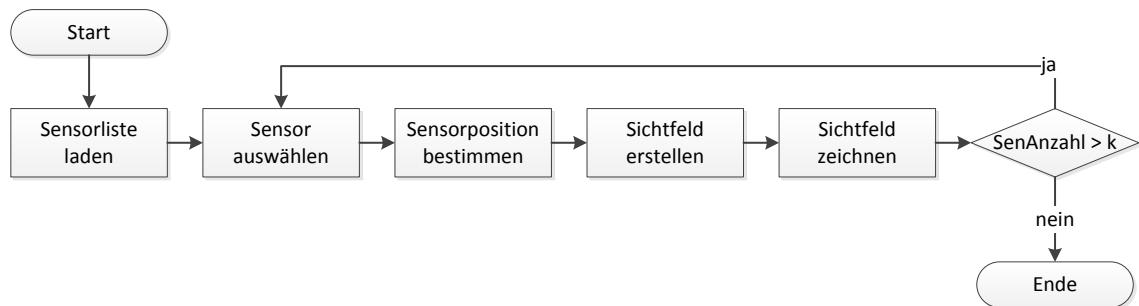


Abbildung 21: Flussdiagramm der Sensorerzeugung

Die Sensorliste wird daraufhin dem Benutzer in einem Dialogfenster zur Sensorauswahl angezeigt (S1, S2), siehe Abbildung 22(a). Nachdem ein Sensor ausgewählt worden ist, wird der Benutzer aufgefordert, die Sensorposition und -ausrichtung zu bestimmen (S3, S4), siehe Abbildung 22(b). Bei der Objektausstattung wird dies innerhalb der Objektkoordinaten durchgeführt.

Mit Hilfe der Sensorposition, Ausrichtung α und β , Reichweite R_{min} und R_{max} , dem Öffnungswinkel ϕ und der Winkelauflösung $\Delta\phi$ wird, ebenfalls mit einer homogenen

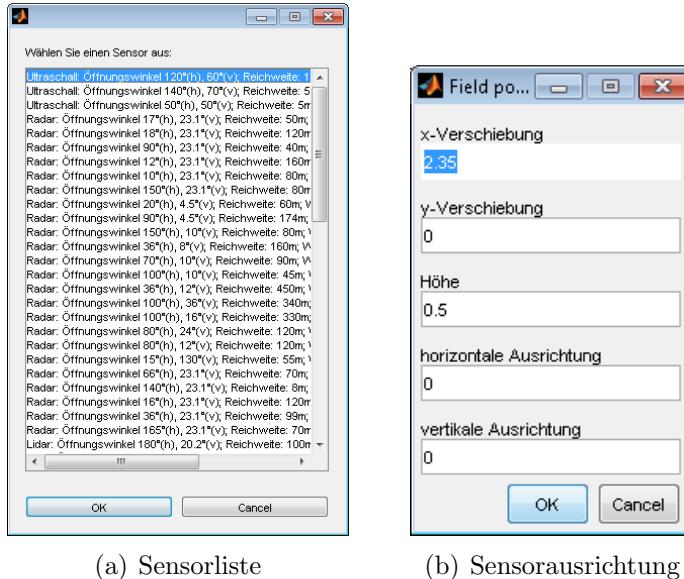


Abbildung 22: Dialogfenster der Sensorausstattung

Koordinatentransformation, das Sichtfeld berechnet [11]:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 & x_0 \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 & y_0 \\ 0 & 0 & 1 & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \sin(\frac{\pi}{2} - \phi) \\ R \cos(\frac{\pi}{2} - \phi) \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Für den Fall wie in Abbildung 23, dass der Sensor von oben auf die Szene blickt, wird dessen Sichtfeld für die 2D-Projektion verkleinert. Zunächst wird die minimale Reichweite R_{min} vergrößert, um den blinden Bereich unterhalb des Sensors zu berücksichtigen:

$$R_{min} = \left| \frac{z_0}{\cos \beta} \right| \quad (15)$$

Um zusätzlich zu berücksichtigen, dass das Sichtfeld auf den Boden trifft, wird anschließend die maximale Reichweite R_{max} um die R_{min} verkürzt:

$$R_{max} = R_{max} - R_{min} \quad (16)$$

Nachdem das Sichtfeld erzeugt worden ist, wird es gezeichnet.

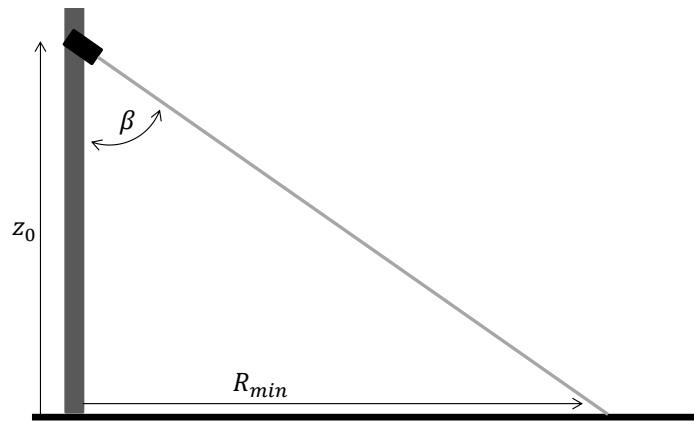


Abbildung 23: Berücksichtigung des blinden Sensorbereichs

5.3.4 Auswertung

Der Ablauf der Auswertung ist in Abbildung 24 dargestellt. Als erstes wird für jeden Sensor überprüft, welche Objekte im Sichtfeld liegen (A1). Hierbei wird in jedem Kreisabschnitt mit dem Winkelschritt $d\phi$ überprüft, ob sich Objektpunkte innerhalb des Polygons befinden, siehe Abbildung 25. Danach wird der Objektabstand zum Sensor bestimmt (A4). Nur die Objekte mit dem geringsten Abstand zum Sensor innerhalb des Abschnittes können als erkannt gesetzt werden. So wird berücksichtigt, dass die vorderen Objekte die Sicht auf weiter hinten liegende Objekte behindern.

Nachdem bestimmt worden ist, welche Objekte der Sensor erfasst, wird die Gesamtwahrscheinlichkeit p_{Gesamt} der Erkennung bestimmt (A3). Hierfür werden in Abhängigkeit vom Sensortyp die Werte aus der Tabelle und der Objektabstand genutzt. Diese Tabelle ist in Abbildung 26 dargestellt. Für die Werte in der Tabelle wurden die Erkenntnissen aus Kapitel 3 herangezogen und zum Teil Annahmen, aufgrund fehlender Daten, getroffen.

Zunächst wird die Erkennungswahrscheinlichkeit des Objekterkennungsalgorithmus $p_{Algorithmus}$ aus der Tabelle entnommen (A2). Danach wird die Wahrscheinlichkeit $p_{Witterung}$ bei entsprechender Witterung entnommen (S5). Je nach Auswahl der Witterung wird zusätzlich die Sichtweite bei Nebel oder die Regenrate berücksichtigt. Ist Nebel ausgewählt worden, wird bei Lidar und Kamera die maximale Reichweite R_{max} verkürzt und auf die Sichtweite bei Nebel gesetzt. Bei Regen wird bei diesen

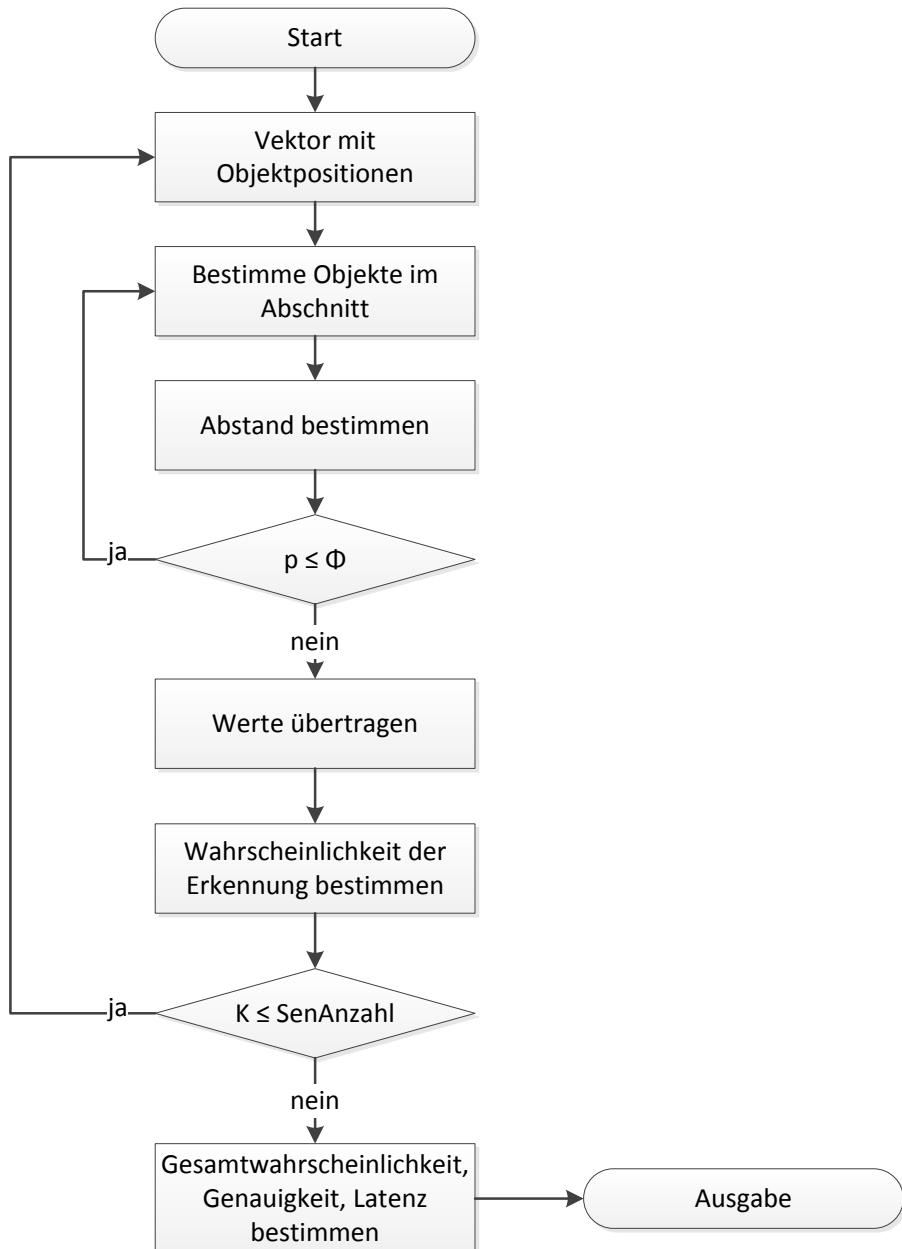


Abbildung 24: Flussdiagramm der Auswertung

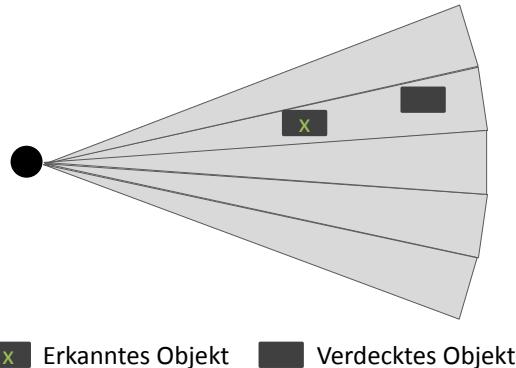


Abbildung 25: Schematische Darstellung der Objekterkennung

	Ultraschall	Radar	Lidar	Kamera (sichtbar)	Kamera (Nahinfrarot)	Kamera (Ferninfrarot)
Tag	1	1	1	1	0.9000	0.9000
Nacht	1	1	1	0.6000	0.9000	0.9000
Trocken	1	1	1	1	1	1
Nebel	1	1	0.8000	0.8000	0.8000	0.8000
Regen	1	1	0.9800	0.9800	0.9800	0.9800
Algorithmus	0.9500	0.9500	0.9500	0.9500	0.9500	0.9500

Abbildung 26: Eingabematrix der Wahrscheinlichkeiten der Objekterkennungseinflüsse

Sensortypen die Wahrscheinlichkeit p_{Regen} noch zusätzlich mit der Regenrate R verändert [12]:

$$p_{Witterung} = p_{Regen} \cdot aR^c \quad (17)$$

Für die empirischen Koeffizienten a und c werden die Werte $a = 0.01$ und $c = 0.6$ aus [12] genutzt. Die American Meteorological Society unterscheidet zwischen vier Regenstärken: leichter Regen mit $R = \leq 2.5 \text{ mm/h}$, mittlerer Regen mit $R = 2.5\text{-}10 \text{ mm/h}$, starker Regen mit $R = 10\text{-}50 \text{ mm/h}$ und schwerer Regen mit $R = \geq 50 \text{ mm/h}$ [1].

Anschließend wird entweder die Wahrscheinlichkeit für die Erkennung bei Tag oder bei Nacht p_{Tag} ausgewählt (S6). Nachfolgend wird die Wahrscheinlichkeit $p_{Abstand}$ aufgrund der Objektentfernung bestimmt (A4). Dazu wird eine lineare Funktion in Abhängigkeit von der minimalen und maximalen Reichweite bzw. Sichtweite angenommen und mit dem Objektabstand ausgewertet.

Im Anschluss werden diese Einflüsse zu der Gesamtwahrscheinlichkeit p_{Gesamt} multipliziert:

$$p_{Gesamt} = p_{Algorithmus} \cdot p_{Witterung} \cdot p_{Tag} \cdot p_{Abstand} \quad (18)$$

Nachdem die Objekterkennung für alle Sensoren durchgeführt worden ist, werden die Wahrscheinlichkeit, die Genauigkeit und die Latenz, mit der ein Objekt erkannt wird, bestimmt (A8). Dafür wird zunächst der jeweilige Wert vom Sensor übertragen. Wenn ein Wert eines anderen Sensors der Infrastruktur oder Objektes vorliegt, wird bei der Latenz der kleinere von beiden Werten genutzt. Von diesem Sensor wird außerdem die Genauigkeit übertragen. Bei der Wahrscheinlichkeit wird der jeweils größere Wert genommen.

Zuletzt werden diese Werte in einer Ausgabematrix auf der Benutzeroberfläche ausgegeben. Diese ist in Abbildung 27 dargestellt.

	Infrastruktur/Objekt	erfasst Objekt Nr	Wahrscheinlichkeit [%]	Genauigkeit [+/- m]	Latenz [ms]
1	I	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, ...	0.14719,	0, 0, 0, ..., 1.5, 0, 0, 1.5, 0, 1.5, ...	400, 350, 350, 400, 350, ...
2	O2	1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, ...	36.1705,	0, 0.604516, ..., 0.05, 0.05, 0.05, 0.05, 0, ...	150, 160, 150, 150, 150, ...
3	O6	1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, ...	0, 0, 0, ..., 0, 0, 0, 90.25, ...	0.05, 0.05, 0.05, 0.05, 0, ...	133, 199, 199, 133, 150, ...

Abbildung 27: Ausgabematrix der Auswertung

6 Studie zur Anwendung des Tools

Für die Bewertung des Simulations-Tools werden in diesem Kapitel vier verschiedene Szenen ausgewertet. Die ersten beiden Beispielen thematisieren die Einflüsse auf die Objekterkennung. Die letzten zwei Szenen umfassen reale Anwendungsbeispiele. Für die Auswertung von mehreren Zeitschritten wurde ein Mechanismus implementiert, der die Szenendaten automatisch lädt und auswertet. Eine Evaluation der Ergebnisse schließt das Kapitel ab.

6.1 Einfluss des Objektabstandes

Diese Szene überprüft den Einfluss des Objektabstandes auf die Objekterkennung, siehe Abbildung 28. Sie besteht aus einer Kreuzung und zwei Fahrzeugen, die sich mit jeweils 50 km/h aufeinander zu bewegen. Objekt 1 (in der unteren Bildhälfte) ist mit einem einzelnen Sensor vom Typ Radar ausgestattet, dessen Spezifikationen der Tabelle 5 zu entnehmen sind.

Tabelle 5: Sensorkonfiguration von Objekt 1

Anz	Typ	$\phi_H/\phi_V [^\circ]$	$R_{min}/R_{max} [\text{m}]$	Tol [$\pm \text{m}$]	$T_{Mess} [\text{ms}]$
1	Radar	66/23.1	0.82/70	0.36	60

Abbildung 29 zeigt den zeitlichen Verlauf der Erkennungswahrscheinlichkeit und des Objektabstandes. Die Szene wurde alle 160 ms ausgewertet, was der Summe aus der Messlatenz T_{Mess} des Sensors und der angegebenen Verarbeitungszeit des Fahrzeugs von 100 ms entspricht. Zu den ersten beiden Zeitpunkten befindet sich das Objekt 2 noch außerhalb der Sensorreichweite und wird somit nicht erkannt. Mit abnehmender Entfernung nimmt die Wahrscheinlichkeit, dass es erkannt wird, linear zu. Dies entspricht dem implementierten Ansatz zur Forderung einer Abhängigkeit der Erkennungswahrscheinlichkeit vom Objektabstand.

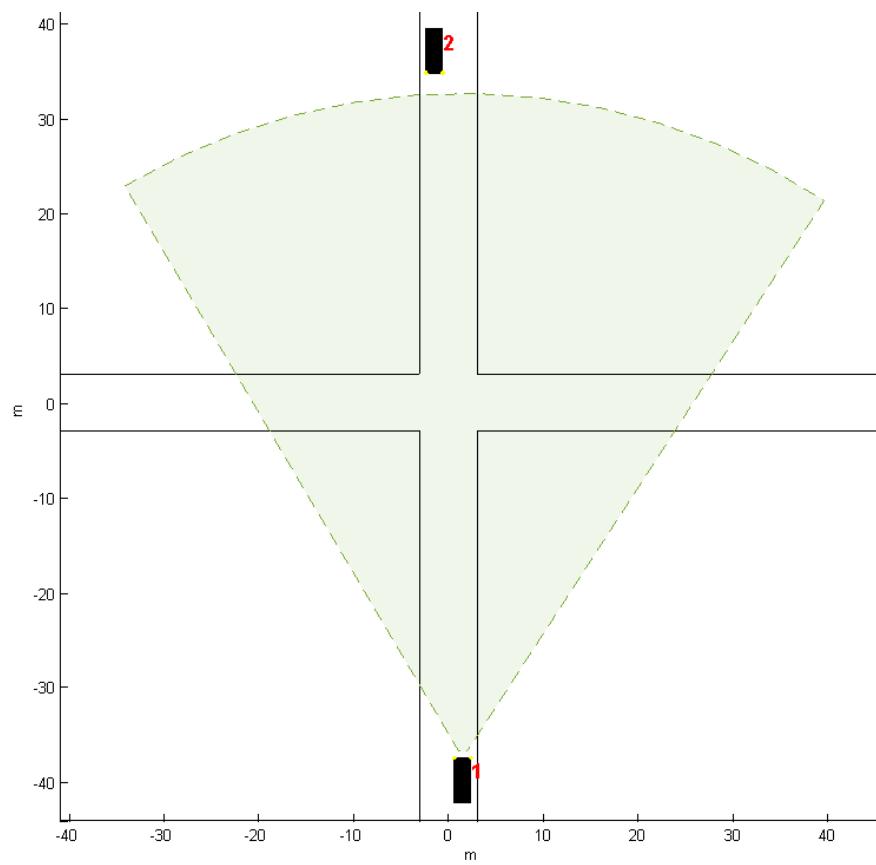


Abbildung 28: Ausgangssituation für die Darstellung des Einfluss des Objektabstandes

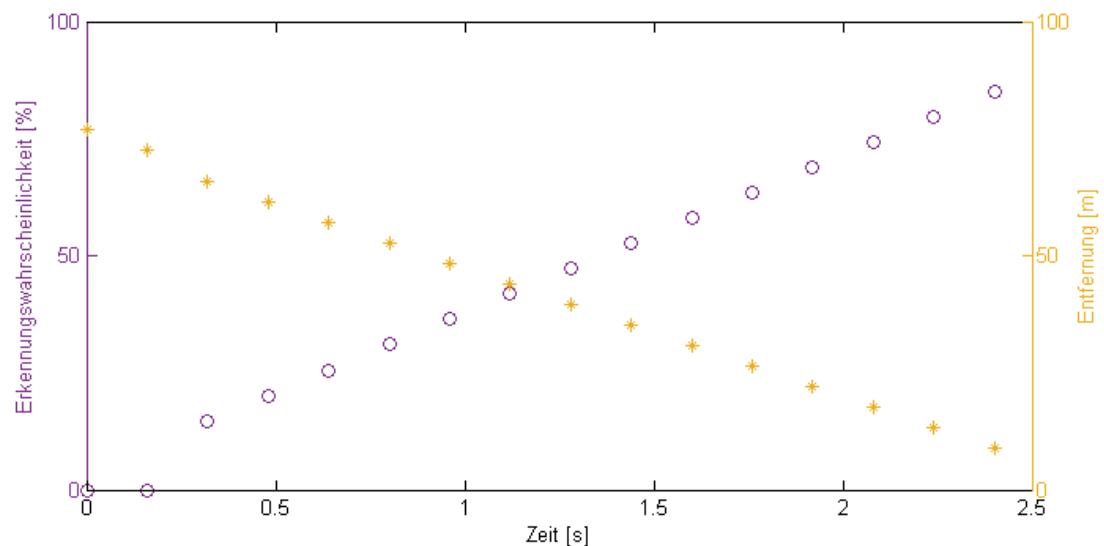


Abbildung 29: Zeitverlauf der Erkennungswahrscheinlichkeit und des Objektabstandes

Aufgrund der angegebenen Wahrscheinlichkeit des Objekterkennungsalgorithmus von $p_{Algorithmus} = 95\%$ und der Tatsache, dass das Objekt 2 an Objekt 1 vorbei fährt, wird eine Erkennungswahrscheinlichkeit von $p_{Gesamt} = 100\%$ nicht erreicht. Nach 2.5 s hat Objekt 2 schließlich das Sensorsichtfeld wieder verlassen und wird nicht mehr erfasst.

6.2 Umwelteinflüsse

Abbildung 30 zeigt ein Objekt im Sensorsichtfeld einer Kamera, die an einem Infrastrukturelement montiert ist. Die Sensorspezifikationen sind in Tabelle 6 aufgeführt. Mit dieser Szene sollen die Umwelteinflüsse auf die Objekterkennung untersucht werden. Aufgrund ihrer hohen Empfindlichkeit auf Umwelteinflüsse wurde für dieses Beispiel eine Kamera, die nur das sichtbare Spektrum erfasst, ausgewählt.

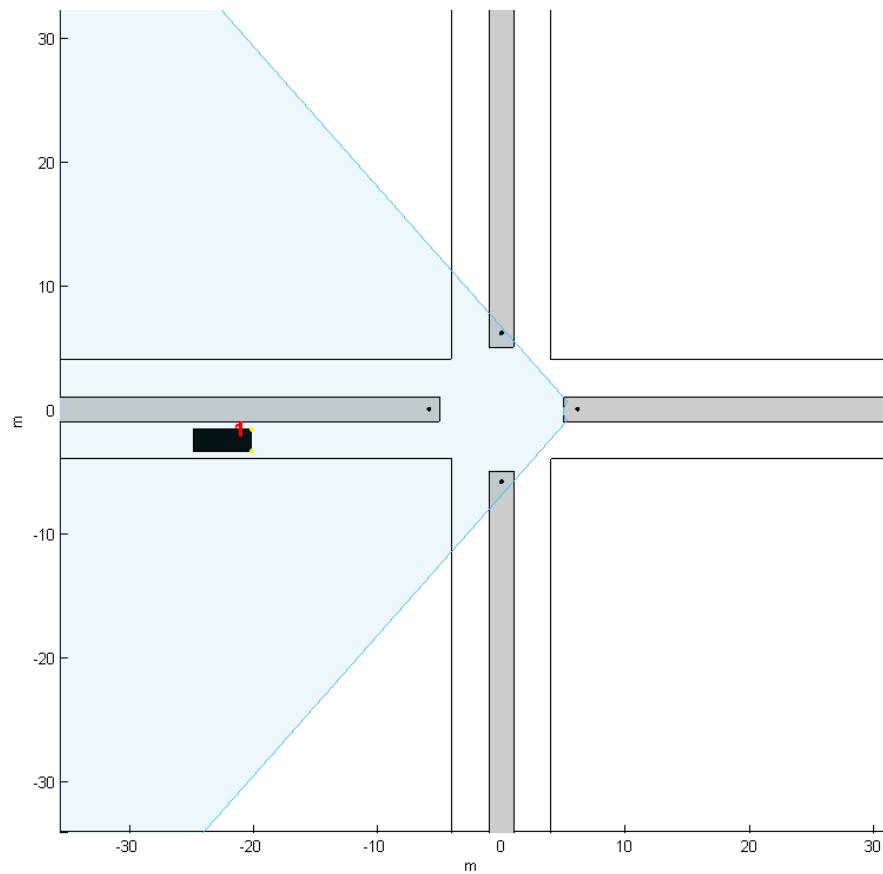


Abbildung 30: Infrastruktur erfasst mit einer Kamera ein Objekt

Tabelle 6: Sensorkonfiguration der Infrastruktur

Anz	Typ	ϕ_H/ϕ_V [°]	R_{min}/R_{max} [m]	Tol [\pm m]	T_{Mess} [ms]
1	Kamera (sichtbar)	97/74	1/77.5	0.25	50

Der Abstand zwischen Objekt und Kamera beträgt 28.6 m. Er bleibt konstant, da nur ein Zeitpunkt betrachtet wird, um den Einfluss der durch die Abstandsänderung auszuschließen. Für die Bewertung des Regeneinflusses wurde die Szene mit verschiedenen Regenraten ausgewertet. Die Überprüfung des Einflusses von Nebel wurde durchgeführt, indem die Szene mit unterschiedlichen Sichtweiten ausgewertet wurde. Beides wurde mit den Tageszeiteinstellungen „Tag“ und „Nacht“ durchgeführt.

Die Ergebnisse für den Einfluss von Regen bei Tag und Nacht sind in Abbildung 31 dargestellt. Die Punkte bei einer Regenrate von 0 mm/h entsprechen dem Ergebnis bei der Witterungsauswahl „Trocken“. Aufgrund des Objektabstandes wird ohne Regen eine Erkennungswahrscheinlichkeit von etwa 65 % am Tage und von 39 % bei Nacht erreicht. Es ist zu erkennen, dass Regen die Objekterkennung kaum beeinflusst. Der Einfluss liegt unter 10 % bei Regenraten von bis zu 40 mm/h, was starkem Regenfall entspricht [1]. Dieses Ergebnis ist zu erwarten, da in [12] der ermittelte Einfluss von Regen gering ausfällt.

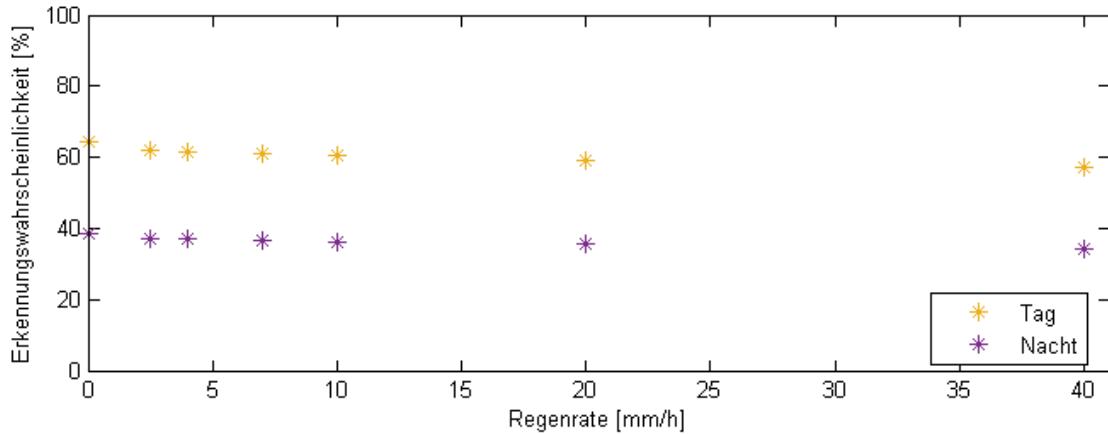


Abbildung 31: Einfluss von Regen auf die Erkennungswahrscheinlichkeiten einer Kamera im sichtbaren Spektrum bei Tag und Nacht

Abbildung 32 zeigt die Ergebnisse für den Einfluss von Nebel bei Tag und Nacht. Die Objekterkennung bei Nebel wird deutlich stärker beeinflusst als bei Regen. Dies ist zum Einen auf die Reduktion der Sichtweite und zum Anderen auf den kleineren Wert der Einflusswahrscheinlichkeit zurückzuführen. Während am Tage bei Regen die Erkennungswahrscheinlichkeit nicht unter 55 % fällt, ist dies bei Nebel schon für Sichtweiten unter 120 m der Fall. Die Tageszeit führt in beiden Fällen lediglich zu einer negativen Verschiebung entlang der y-Achse.

Nebel mit Sichtweiten, welche die Reichweite dieses Sensors von $R_{max} = 77.5$ m übersteigen, reduzieren nicht die Reichweite. Ab diesem Wert wird ausschließlich die in der Tabelle eingetragene Einflusswahrscheinlichkeit für Nebel berücksichtigt. Aus diesem Grund ist die Erkennungswahrscheinlichkeit ab diesem Wert nahezu konstant.

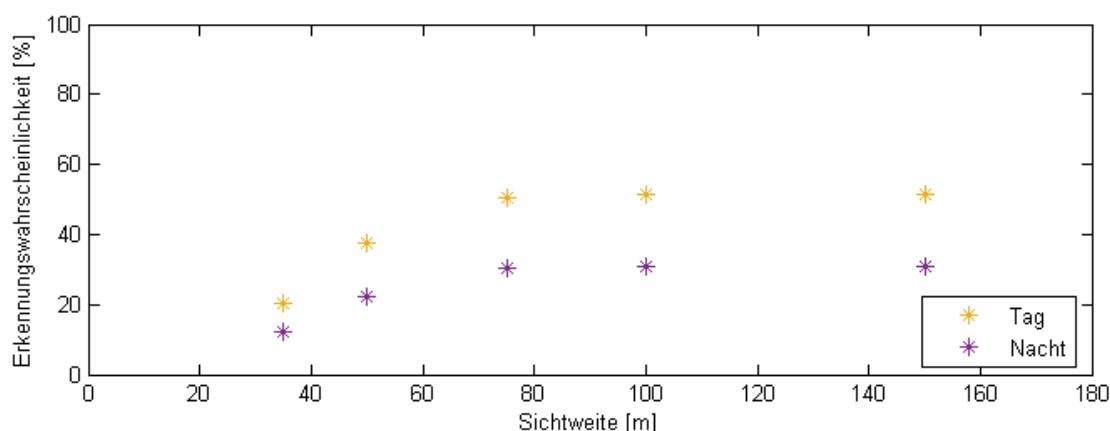


Abbildung 32: Einfluss von Nebel auf die Erkennungswahrscheinlichkeiten einer Kamera im sichtbaren Spektrum bei Tag und Nacht

6.3 Vergleich von zwei Sensorkonfigurationen

Ein Anwendungsfall ist der Vergleich von verschiedenen Sensorkonfigurationen. Dies wurde im Rahmen dieser Arbeit beispielhaft mit den Forschungsfahrzeugen TIAMO der TU BS und dem FASCarE des DLR durchgeführt, siehe Abbildung 11. Die Sensorkonfigurationen der beiden Fahrzeuge sind in Tabelle 7 aufgeführt. Der Einbauort der Sensoren ist mit F (Front) und H (Heck) gekennzeichnet.

Tabelle 7: Sensorkonfigurationen des FASCarE (DLR) und des TIAMO (TU BS)

FASCarE						
Anz	Ort	Typ	ϕ_H/ϕ_V [°]	R_{min}/R_{max} [m]	Tol [$\pm m$]	T_{Mess} [ms]
5	F	Lidar	110/3.2	0.3/200	0.05	80
2	F	Radar	66/23.1	0.82/70	0.36	60
1	F	Radar	12/23.1	0.36/160	0.12	60
1	F	Kamera	50/28 (sichtbar)	1/120	0.25	33
1	H	Lidar	110/3.2	0.3/200	0.05	80
2	H	Radar	140/23.1	0.82/8	0.36	60
1	H	Radar	16/23.1	0.82/120	0.36	60

TIAMO						
Anz	Ort	Typ	ϕ_H/ϕ_V [°]	R_{min}/R_{max} [m]	Tol [$\pm m$]	T_{Mess} [ms]
2	F	Lidar	110/3.2	0.3/200	0.05	80
1	F	Radar	12/23.1	0.36/160	0.12	60
1	F	Kamera	50/28 (sichtbar)	1/120	0.25	33
1	H	Lidar	190/20.2	0/80	0.025	13
2	H	Lidar	110/3.2	0.3/200	0.05	80
2	H	Radar	165/23.1	0.75/70	1.50	50

Das FASCarE ist mit 13 Sensoren ausgestattet und am TIAMO sind neun Sensoren verbaut. In der Front ist das FASCarE mit drei Radaren, fünf Lidaren und einer Kamera teils redundant und teils komplementär ausgestattet. Beim TIAMO werden ein Radar, zwei Lidare und eine Kamera redundant und komplementär in der Front verwendet. Am Heck hingegen sind beim TIAMO fünf Sensoren verbaut, während das FASCarE am Heck mit vier Sensoren ausgestattet ist.

Für die Bewertung der beiden Fahrzeugkonfigurationen wurden diese in die gleiche Szene gesetzt, die in den Abbildungen 33(a) und 33(b) für beide Fahrzeuge dargestellt ist. Die Szene ist eine Momentaufnahme mit insgesamt sieben Fahrzeugen, die auf eine Kreuzung zufahren. Das Objekt 1 wurde jeweils mit der Fahrzeugkonfiguration

des FASCarE und des TIAMO ausgesattet. In beiden Fällen ist zu erkennen, dass die Sichtfelder beider Fahrzeuge nahezu die gesamte Umgebung abdecken. Des Weiteren verdeutlichen diese Abbildungen noch einmal die Redundanzen der Sichtfelder.

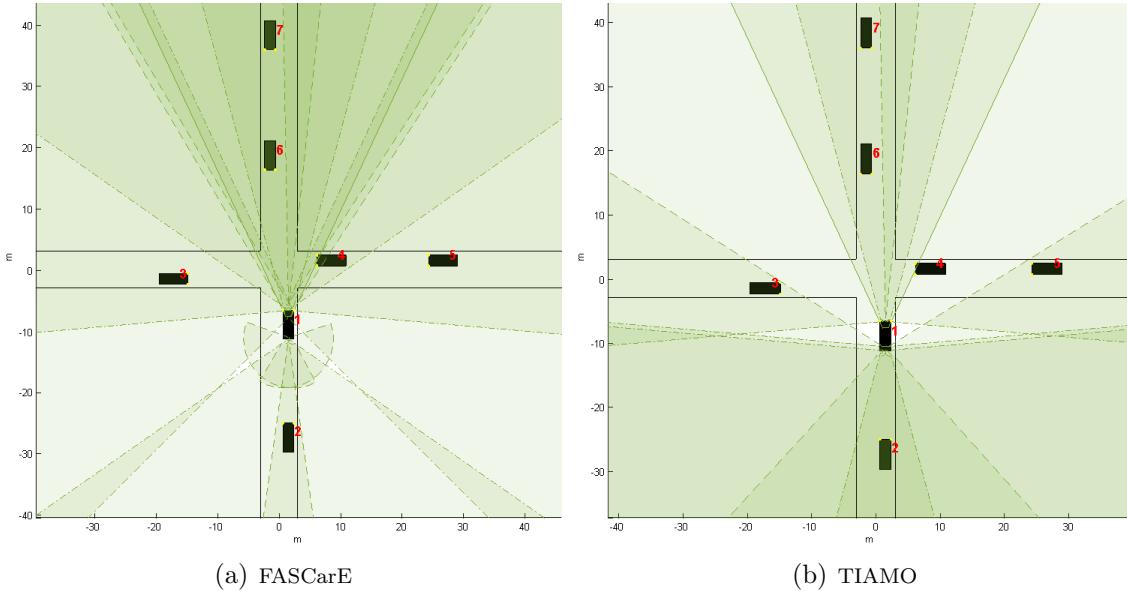


Abbildung 33: Szene zum Vergleich der Sensorkonfiguration vom FASCarE und TIAMO

Tabelle 8 führt die erfassten Objekte und die Genauigkeit und Latenz der Messung in dem untersuchten Zeitpunkt auf. Beide Fahrzeuge erfassen alle sechs Objekte, jedoch mit unterschiedlichen Genauigkeiten und Latzenzen. Das Objekt 2 wird vom TIAMO 47 ms früher und mit einer höheren Genauigkeit erfasst als vom FASCarE, da ein Lidar mit höherer Genauigkeit und geringerer Latenz beim TIAMO verbaut ist. Die Objekte 3 und 5 werden ebenfalls vom TIAMO früher erfasst, jedoch mit einer Genauigkeit von ± 1.5 m. 30 ms später, wenn die Daten aller Sensoren vorliegen, wäre die Genauigkeit ebenfalls bei ± 0.05 m. Das Objekt 4 wird von beiden mit dem gleichen Lidar und die Objekte 6 und 7 werden von beiden mit der gleichen Kamera erfasst, weswegen es keine Unterschiede bezüglich der Latenz und Genauigkeit gibt.

Tabelle 8: Genauigkeiten und Latenzen der Sensorkonfigurationen des FASCarE (DLR) und des TIAMO (TU BS)

FASCarE						
erfasst Objekt	2	3	4	5	6	7
Genauigkeit [$\pm m$]	0.36	0.05	0.05	0.05	0.25	0.25
Latenz [ms]	160	180	180	180	133	133
TIAMO						
erfasst Objekt	2	3	4	5	6	7
Genauigkeit [$\pm m$]	0.025	1.5	0.05	1.5	0.25	0.25
Latenz [ms]	113	150	180	150	133	133

Wird hingegen die Erkennungswahrscheinlichkeit beider Fahrzeuge in Abbildung 34 verglichen, fällt nur bei Nebel ein deutlicher Unterschied auf (Sterne und Kreise in Rot). Aufgrund der höheren Reichweite des Heckradars beim FASCarE erfasst dieses das Objekt 2 mit einer Wahrscheinlichkeit von 84 % bei Nebel mit einer Sichtweite von 100 m. Die Erkennungswahrscheinlichkeit des TIAMO für das Objekt 2 beträgt hingegen 76 %. Die Objekte 3 und 5 werden vom TIAMO durch die Heckradare bei Nebel mit einer höheren Wahrscheinlichkeit erfasst als von den Frontlidaren des FASCarE. Diese betragen 69 % und 60 % beim TIAMO und 62 % und 57 % beim FASCarE. Objekt 6 wird mit 64 % hingegen vom FASCarE aufgrund der Frontradare besser erfasst als vom TIAMO mit 58 %. Der vollständigkeithalber wurde außerdem eine Auswertung bei Nacht durchgeführt. Da Radar und Lidar von der Tageszeit unabhängig sind ist diese Auswertung in Abbildung 39 im Anhang zu finden.

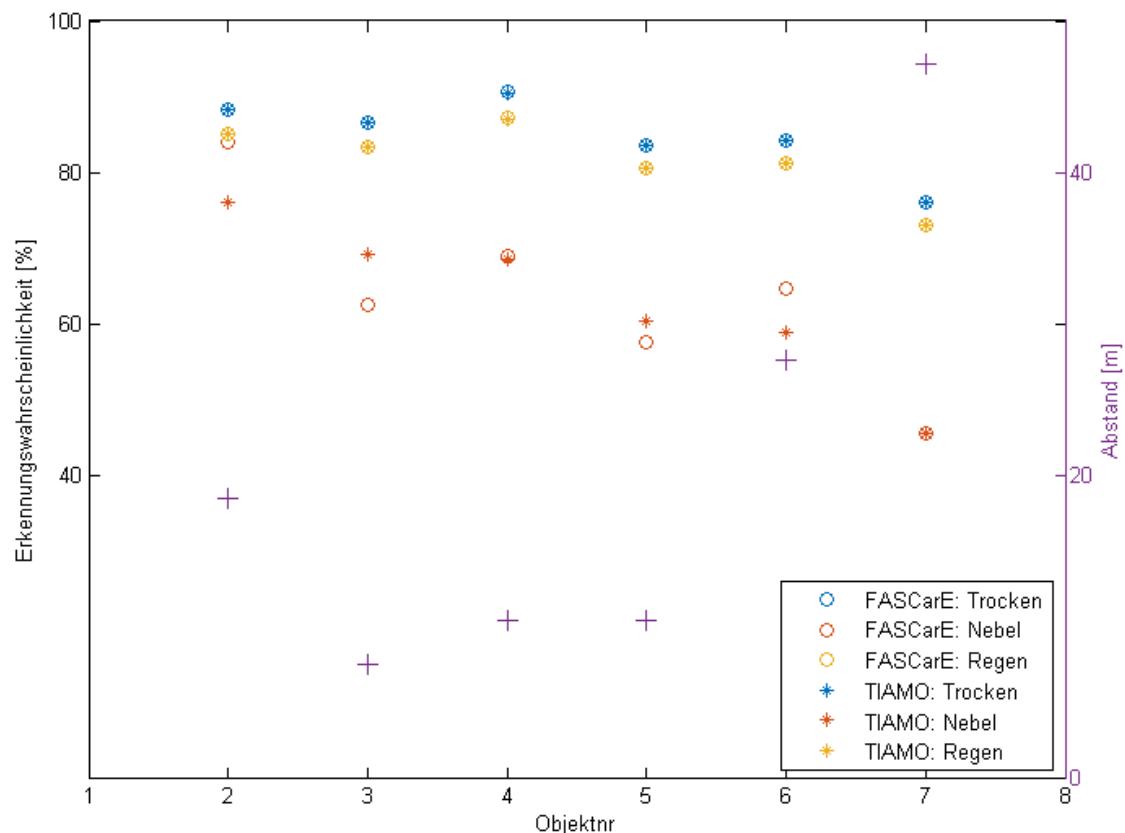


Abbildung 34: Vergleich der Erkennungswahrscheinlichkeiten vom FASCarE und TIAMO bei Tag zu unterschiedlichen Witterungen

6.4 Forschungskreuzung

Ein weiterer Anwendungsfall ist die Analyse von Sensorkonfigurationen der Infrastruktur. Dafür wurden die Daten der Forschungskreuzung des DLR in Braunschweig genutzt. Die Sensorspezifikationen der Kreuzung sind in Tabelle 9 aufgeführt. Vier Ampelmaste sind mit Kameras jedes Typs ausgestattet und auf die Kreuzungsmitte gerichtet, siehe Abbildung 35(b). Für die Auswertung wurden 34 Objekte innerhalb von 43.52 s aus Daten der Forschungskreuzung ausgewählt. Die Trajektorien und Aufenthaltszeiten der Objekte sind in den Abbildungen 36(a) und 36(b) dargestellt. Da die Objektdaten des Datensatzes erst ab dem Zeitpunkt, zu dem sich das Objekt bewegt, vorliegen, wurden die Anwesenheitszeiten verlängert, sodass die Objekte sich um bis zu 100 ms früher an der Kreuzung befinden. Außerdem wurden Objekte, die an ähnlichen Punkten zu ähnlichen Zeiten beginnen, entlang der Fahrspur nach hinten versetzt, damit sich bei der Simulation keine Objekte aufeinander befinden. Des Weiteren wurde das Objekt 2 mit der Sensorkonfiguration des FASCarE ausgestattet, siehe Abbildung 35(a), und das Objekt 21 mit der vom TIAMO, siehe Abbildung 35(c).

Tabelle 9: Sensorkonfiguration für den Innenbereich der Forschungskreuzung

Anz	Typ	ϕ_H/ϕ_V [°]	R_{min}/R_{max} [m]	Tol [$\pm m$]	T_{Mess} [ms]
4	Kamera (sichtbar)	97/74	1/77.5	0.25	50
4	Kamera (NIR)	42.6/34.7	1/77.5	0.25	50

Abbildung 37 zeigt die Verläufe der Erkennungswahrscheinlichkeiten von fünf Objekten innerhalb von 35 s bei Tag und Nacht. Zu erkennen ist, dass zum Einen die Erkennungswahrscheinlichkeiten bei Nacht geringer sind und sich zum Anderen die Verläufe unterscheiden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich am Tage die zwei Kameratypen gegenseitig ergänzen und bei Nacht die Objekte hauptsächlich von der Infrarotkamera erfasst werden. Eine Auswertung am Tage mit Nebel ist in Abbildung 40 im Anhang zu finden. Der Nebel führt ausschließlich zu einer Verringerung der Erkennungswahrscheinlichkeit von etwa 20 %. Die Sprünge in

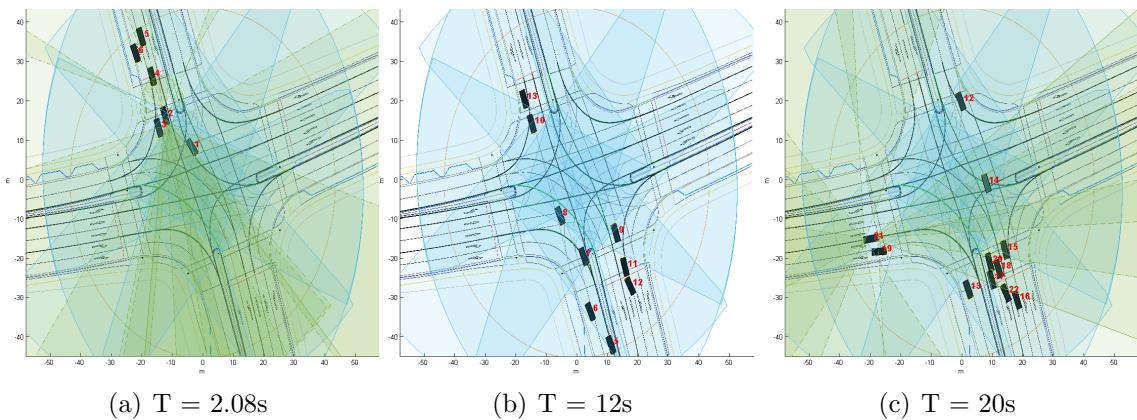
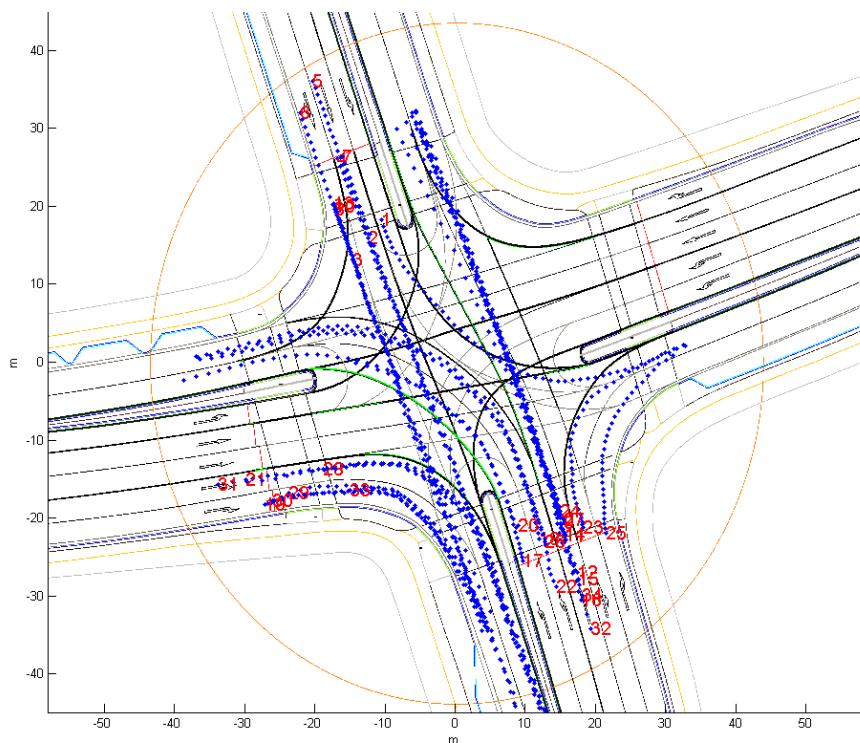


Abbildung 35: Drei Szenen auf der Forschungskreuzung. Blau: Sichtfelder der Infrastruktursensoren. Grün: Sichtfelder der Objektsensoren

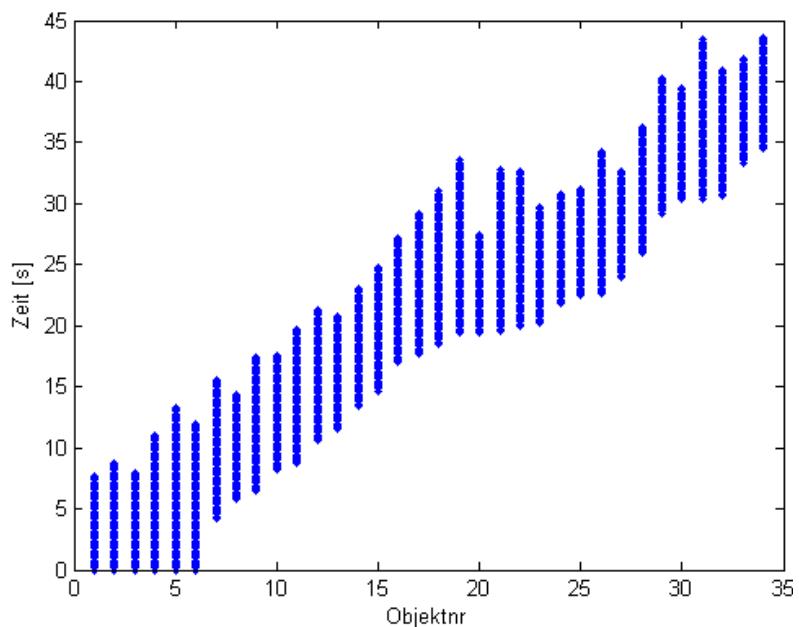
den Verläufen sind auf Sichtfeldwechsel der Objekte, während sie die Kreuzung überqueren, zurückzuführen.

Eine weitere Einsatzmöglichkeit ist der Vergleich der Erkennungswahrscheinlichkeiten eines mit Sensorik ausgestatteten Fahrzeugs und der Infrastruktursensoren. Abbildung 38(a) zeigt hierfür die Verläufe der Erkennungswahrscheinlichkeiten des FASCarE und der Forschungskreuzung. Für die Fahrsituation, bei der das FASCarE geradeaus von Nord nach Süd über die Kreuzung fährt, fallen die Erkennungswahrscheinlichkeiten beim FASCarE höher aus als die der Infrastruktur. Bei der Erfassung von Objekt 3 hingegen bricht die Wahrscheinlichkeit beim FASCarE für etwa 2 s ein. Dies könnte per C2X-Kommunikation in diesem Zeitraum von der Forschungskreuzung aufgefangen werden. Die Erkennungswahrscheinlichkeiten für die Objekte 4 und 6 fallen bei der Forschungskreuzung deutlich geringer aus als beim FASCarE, da sie sich im nahen Umfeld des FASCarE befinden, was aufgrund des geringeren Abstandes zu einer höheren Erkennungswahrscheinlichkeit führt.

Das gleiche trifft auch auf die Verläufe des TIAMO und der Forschungskreuzung in Abbildung 38(b) zu. Die Fahrsituation hier ist, dass das TIAMO von Westen aus kommend rechts abbiegt und nach Süden fährt. Hier könnten die erfassten Daten von Objekt 17 von der Forschungskreuzung in den ersten 2 s per C2X-Kommunikation an das TIAMO weitergegeben werden.



(a) Trajektorien



(b) Aufenthaltszeiten

Abbildung 36: Trajektorien und Aufenthaltszeiten von 34 Objekten auf der Forschungskreuzung

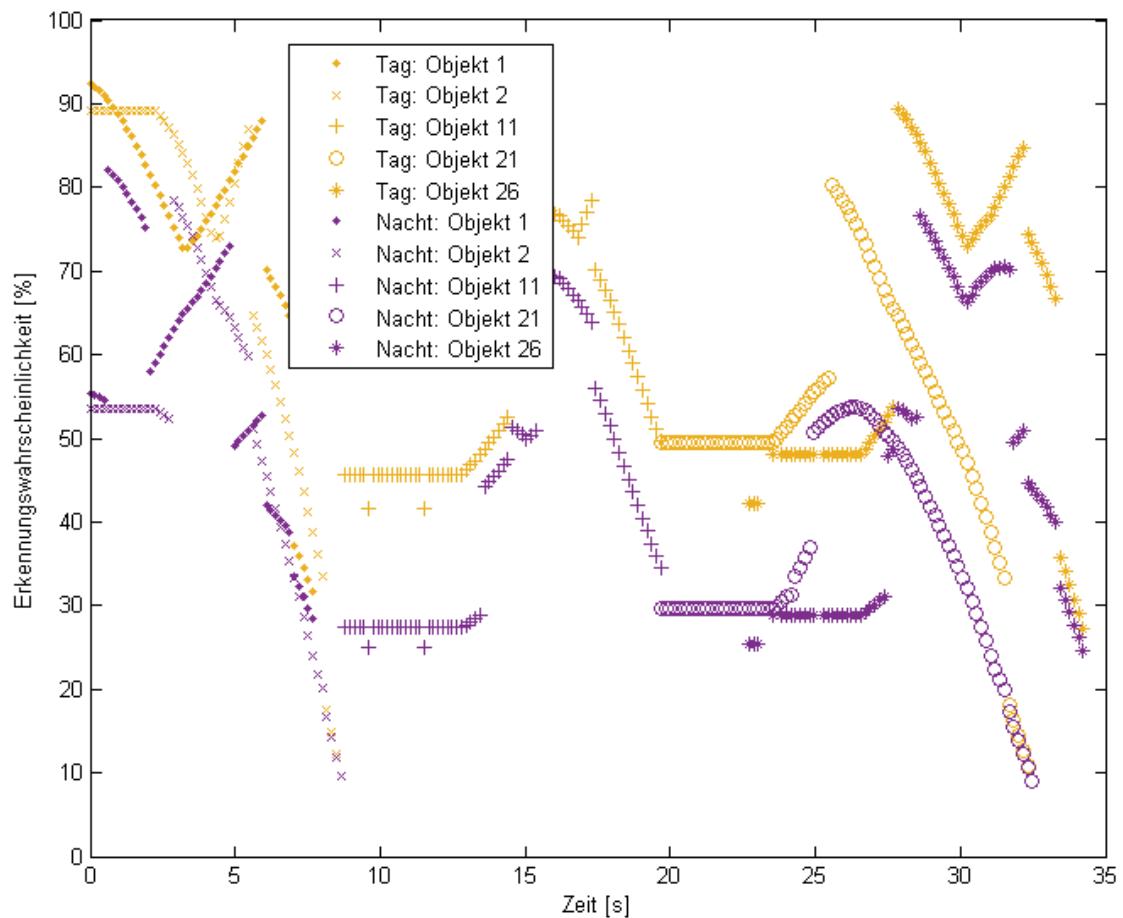


Abbildung 37: Erkennungswahrscheinlichkeiten der Forschungskreuzung von fünf Objekten bei Tag und bei Nacht

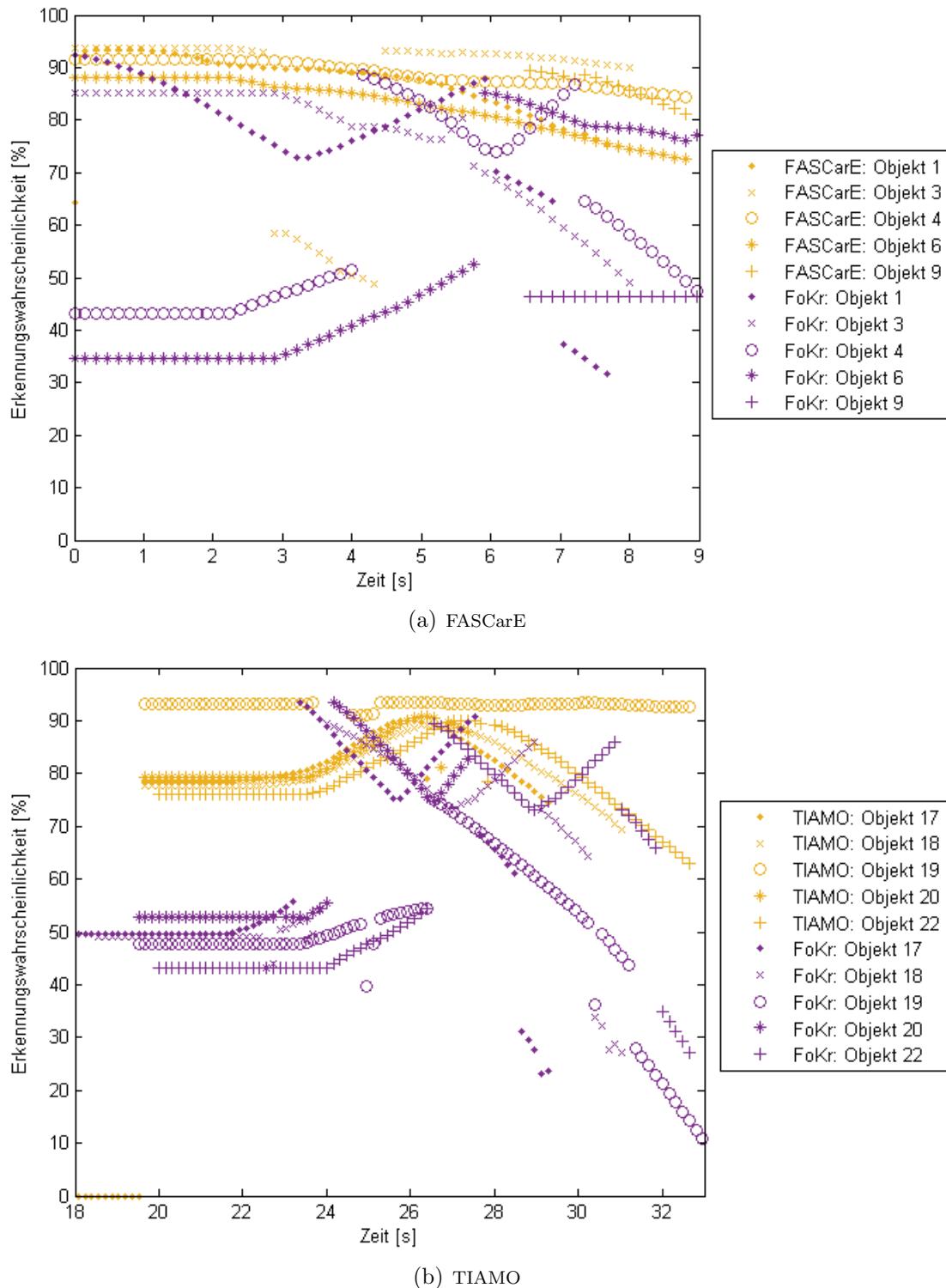


Abbildung 38: Vergleich der Erkennungswahrscheinlichkeiten der Forschungskreuzung mit denen des FASCarE und des TIAMO

6.5 Evaluation

Die Analyse der vier Szenen zeigt, dass folgende Einflüsse auf die Objekterkennung im Simulations-Tool berücksichtigt werden: Objektabstand, Tageszeit, Witterung, Objekterkennungsalgorithmus. Eine erste Auslegung von Sensorkonfigurationen für Fahrzeuge und für Infrastrukturelemente ist somit bereits möglich. Für die Systemauslegung gibt das Tool aus, welche Objekte erfasst werden und mit welcher Wahrscheinlichkeit, welcher Genauigkeit und welcher Latenz dies geschieht. Bei der Objekterfassung werden jedoch bislang keine sichtverdeckende Elemente wie Häuser und Bäume berücksichtigt. Des Weiteren wurde die Sensordatenfusion nur mit einem simplen Ansatz umgesetzt. Dafür wurde zum Einen bei der Erkennungswahrscheinlichkeit der größte Wert einer Sensorkonfiguration genutzt und zum Anderen bei der Genauigkeit und der Latenz nur die Daten des Sensors mit der geringsten Latenz. Dadurch, dass mit dem Tool nur explizite Zeitpunkte untersucht werden können, wird außerdem nicht berücksichtigt, dass sich die Erkennungswahrscheinlichkeit eines Objektes durch ein Objekttracking mit der Zeit erhöht.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit ist die Erstellung eines Simulations-Tools zur Auslegung und Bewertung von Sensorsystemkonzepten zur infrastrukturellen Umfelderfassung im Hinblick auf das automatisierte Fahren. Dazu wurden in den Grundlagen zunächst die Eigenschaften der Umfelderfassungssensoren Ultraschall, Radar, Lidar und Kamera erarbeitet. Dem schloss sich eine Recherche bezüglich bestehender Sensorkonfigurationen von Fahrzeugen und in der Infrastruktur an. Anhand der erlangten Erkenntnisse wurden Anforderungen an das Simulations-Tool ermittelt. Die Anforderungen wurden schließlich in Matlab umgesetzt. Das Ergebnis ist ein Programm mit einer Benutzeroberfläche, die es dem Benutzer ermöglicht Sensorkonfigurationen auszuwerten. Es können drei verschiedene Straßenführungen gewählt sowie Objekte und Sensoren platziert werden. Für die Bewertung der Konfigurationen kann die Tageszeit ausgewählt, die Witterung eingestellt, die Verarbeitungslatenz der Infrastruktur und der Objekte angegeben und die Erkennungswahrscheinlichkeit der Objekterkennungsalgorithmen angegeben werden. Anschließend werden die erfassten Objekte mit Erkennungswahrscheinlichkeit, Genauigkeit und Latenz ausgegeben.

Die Anwendbarkeit wurde schließlich mit vier verschiedenen Szenen evaluiert. Das Ergebnis dieser Studie zeigte, dass die Einflüsse Tageszeit, Witterung und Objekterkennungsalgorithmus auf die Objekterkennung berücksichtigt werden. Dadurch sind eine erste Auswertung und ein Vergleich von Sensorkonfigurationen bereits möglich.

Zur Verbesserung der Auswertung der Konfigurationen kann das Simulations-Tool jedoch noch um Funktionen erweitert werden. Weitere Arbeiten könnten sich damit beschäftigen, die verschiedenen Ansätze der Sensordatenfusion zu implementieren. Im Rahmen dessen könnte auch die C2X-Kommunikation integriert werden. Außerdem könnte das Tool um eine zeitliche Auswertung erweitert werden, sodass auch der Einfluss des Objekttrackings berücksichtigt werden kann. Dadurch könnte schließlich ausgewertet werden, wann welcher Sensor welches Objekt erfasst. Des Weiteren kann die Objekterkennung noch erweitert werden, indem sichtverdeckende Elemente, wie Häuser, eingebaut werden und eine funktionale Abhängigkeit für Lichtverhältnisse berücksichtigt wird. Eine Option zum Ein- und Ausblenden der Sensorsichtfelder würde zu einer übersichtlicheren Darstellung der Szene verhelfen.

Literatur

- [1] AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY (Hrsg.): *Glossary of Meteorology*. 25.04.2012
- [2] AHTIAINEN, J. ; TERHO, S. ; KOPONEN, S. : Radar based detection and tracking of a walking human. In: *IFAC Proceedings Volumes* 43 (2010), Nr. 16, S. 437–442. <http://dx.doi.org/10.3182/20100906-3-IT-2019.00076>. – DOI 10.3182/20100906-3-IT-2019.00076. – ISSN 14746670
- [3] ALEXANDER, L. ; PI-MING CHENG ; GORJESTANI, A. ; MENON, A. ; NEWSTROM, B. ; SHANKWITZ, C. ; DONATH, M. : The Minnesota Mobile Intersection Surveillance System. In: *2006 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*, S. 139–144
- [4] APATEAN, A. ; ROGOZAN, A. ; BENSRHAIR, A. : Visible-infrared fusion schemes for road obstacle classification. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 35 (2013), S. 180–192. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2013.07.003>. – DOI 10.1016/j.trc.2013.07.003. – ISSN 0968090X
- [5] BARTSCH, A. ; FITZEK, F. ; RASSHOFER, R. H.: Pedestrian recognition using automotive radar sensors. In: *Advances in Radio Science* 10 (2012), S. 45–55. <http://dx.doi.org/10.5194/ars-10-45-2012>. – DOI 10.5194/ars-10-45-2012
- [6] BENGLER, K. (Hrsg.) ; DRÜKE, J. (Hrsg.) ; HOFFMANN, S. (Hrsg.) ; MANSTETTEN, D. (Hrsg.) ; NEUKUM, A. (Hrsg.): *UR:BAN Human Factors in Traffic*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-15418-9>. – ISBN 978-3-658-15417-2
- [7] BROGGI, A. ; BUZZONI, M. ; DEBATTISTI, S. ; GRISLERI, P. ; LAGHI, M. C. ; MEDICI, P. ; VERSARI, P. : Extensive Tests of Autonomous Driving Technologies. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 14 (2013), Nr. 3, S. 1403–1415. <http://dx.doi.org/10.1109/TITS.2013.2262331>. – DOI 10.1109/TITS.2013.2262331. – ISSN 1524–9050

- [8] DATONDJI, SOKEMI RENE EMMANUEL ; DUPUIS, Y. ; SUBIRATS, P. ; VASSEUR, P. : A Survey of Vision-Based Traffic Monitoring of Road Intersections. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 17 (2016), Nr. 10, S. 2681–2698. <http://dx.doi.org/10.1109/TITS.2016.2530146>. – DOI 10.1109/TITS.2016.2530146. – ISSN 1524–9050
- [9] DR ROLAND KRZIKALLA: *Vehicle Self-Localization using Laserscanners*. 2013-09-18
- [10] ERNST, S. ; RIEKEN, J. ; MAURER, M. : Behaviour recognition of traffic participants by using manoeuvre primitives for automated vehicles in urban traffic. In: *2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, S. 976–983
- [11] F. WAHL, E. JOERNS, J. SCHWARTZE, D. KUBUS: *Robotik I*. Institut für Robotik und Prozessinformatik, Tu Braunschweig,
- [12] GOODIN, C. ; CARRUTH, D. ; DOUDE, M. ; HUDSON, C. : Predicting the Influence of Rain on LIDAR in ADAS. In: *Electronics* 8 (2019), Nr. 1, S. 89. <http://dx.doi.org/10.3390/electronics8010089>. – DOI 10.3390/electronics8010089. – ISSN 2079–9292
- [13] HENNING MOSEBACH: *Das TS Forschungsfahrzeug FASCarE*. 2015-10-02
- [14] HERING, E. ; MARTIN, R. ; STOHRER, M. : *Physik für Ingenieure*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2016. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-49355-7>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-49355-7>. – ISBN 978–3–662–49354–0
- [15] HOSPEDALES, T. ; GONG, S. ; XIANG, T. : Video Behaviour Mining Using a Dynamic Topic Model. In: *International Journal of Computer Vision* 98 (2012), Nr. 3, S. 303–323. <http://dx.doi.org/10.1007/s11263-011-0510-7>. – DOI 10.1007/s11263-011-0510-7. – ISSN 0920–5691
- [16] J. EHRLICH ET AL.: *SP2 - INFRASENS - SP Infrastructure Platform*. 2009

- [17] JODOIN, J.-P. ; BILODEAU, G.-A. ; SAUNIER, N. : Urban Tracker: Multiple object tracking in urban mixed traffic. In: *2014 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)*, S. 885–892
- [18] KEEGAN GARCIA, MINGJIAN YAN, ALEK PURKOVIC: Robust traffic and intersection monitoring using millimeter wave sensors. 2018
- [19] KLAUS DIETMAYER, ALEXANDER KIRCHNER UND NICO KÄMPCHEN: Fusionsarchitekturen zur Umfeldwahrnehmung für zukünftige Fahrerassistenzsysteme. In: MAURER, M. (Hrsg.) ; STILLER, C. (Hrsg.): *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*. Berlin/Heidelberg : Springer-Verlag, 2005. – ISBN 3-540-23296-6, S. 59–88
- [20] KNAKE-LANGHORST, S. ; GIMM, K. ; FRANKIEWICZ, T. ; KÖSTER, F. : Test Site AIM – Toolbox and Enabler for Applied Research and Development in Traffic and Mobility. In: *Transportation Research Procedia* 14 (2016), S. 2197–2206. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.235>. – DOI 10.1016/j.trpro.2016.05.235. – ISSN 23521465
- [21] KONSTANTINOS KANISTRAS, GONCALO MARTINS, MATTHEW J. RUTHERFORD, KIMON P. VALAVANIS: A Survey of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for Traffic Monitoring. 2013
- [22] LEONHARD F. WALCHSHÄUSL: *Maschinelle Erkennung von Verkehrsteilnehmern mittels heterogener Sensorik*. München, Technische Universität München, Diss., 2008
- [23] LUNDGREN, M. ; STENBORG, E. ; SVENSSON, L. ; HAMMARSTRAND, L. : Vehicle self-localization using off-the-shelf sensors and a detailed map. In: *2014 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, S. 522–528
- [24] MANDY DOTZAUER AND SASCHA KNAKE-LANGHORST AND FRANK KÖSTER: Understanding Interactions Between Bicyclists and Motorists in Intersections. Version: 2018. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-15418-9{_}17. In: BENGELER, K. (Hrsg.) ; DRÜKE, J. (Hrsg.) ; HOFFMANN, S. (Hrsg.) ; MANS-TETTEN, D. (Hrsg.) ; NEUKUM, A. (Hrsg.): *UR:BAN Human Factors in Traffic*.

- Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018. – DOI 10.1007/978-3-658-15418-9_17. – ISBN 978-3-658-15417-2, S. 311–324
- [25] MEISSNER, D. ; REUTER, S. ; DIETMAYER, K. : Real-time detection and tracking of pedestrians at intersections using a network of laserscanners. In: *2012 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, S. 630–635
- [26] MICHAEL GOLDHAMMER, ELIAS STRIGEL, DANIEL MEISSNER, ULRICH BRUNSMANN, KONRAD DOLL, KLAUS DIETMAYER: Cooperative Multi Sensor Network for Traffic Safety Applications at Intersections. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 2012. – ISSN 1524–9050
- [27] NEGIED, N. K. ; HEMAYED, E. E. ; FAYEK, M. B.: Pedestrians' detection in thermal bands – Critical survey. In: *Journal of Electrical Systems and Information Technology* 2 (2015), Nr. 2, S. 141–148. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jesit.2015.06.002>. – DOI 10.1016/j.jesit.2015.06.002. – ISSN 23147172
- [28] PERRONE, D. ; IOCCHI, L. ; ANTONELLO, P. C.: Real-time Stereo Vision Obstacle Detection for Automotive Safety Application. In: *IFAC Proceedings Volumes* 43 (2010), Nr. 16, S. 240–245. <http://dx.doi.org/10.3182/20100906-3-IT-2019.00043>. – DOI 10.3182/20100906-3-IT-2019.00043. – ISSN 14746670
- [29] RUDI LINDL: *Tracking von Verkehrsteilnehmern im Kontext von Multisensorsystemen*. München, TU München, Diss., 2009
- [30] SCHINDLER, A. : Vehicle self-localization with high-precision digital maps. In: *2013 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, S. 141–146
- [31] TRÄNKLER, H.-R. ; REINDL, L. M.: *Sensortechnik*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2014. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-29942-1>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-29942-1>. – ISBN 978-3-642-29941-4
- [32] TU BRAUNSCHWEIG: *Datenblatt Versuchsträger TIAMO*. 09.05.2016
- [33] VIVACQUA, R. ; VASSALLO, R. ; MARTINS, F. : A Low Cost Sensors Approach for Accurate Vehicle Localization and Autonomous Driving Application. In:

Sensors (Basel, Switzerland) 17 (2017), Nr. 10. <http://dx.doi.org/10.3390/s17102359>. – DOI 10.3390/s17102359. – ISSN 1424–8220

- [34] WANG, G. ; LIU, Q. : Far-Infrared Based Pedestrian Detection for Driver-Assistance Systems Based on Candidate Filters, Gradient-Based Feature and Multi-Frame Approval Matching. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 15 (2015), Nr. 12, S. 32188–32212. <http://dx.doi.org/10.3390/s151229874>. – DOI 10.3390/s151229874. – ISSN 1424–8220
- [35] WINNER, H. ; HAKULI, S. ; LOTZ, F. ; SINGER, C. : *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-05734-3>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-05734-3>. – ISBN 978–3–658–05733–6
- [36] WOLF, G. ; PIETZSCH, W. : *Strassenplanung*. 7., überarb. Aufl. [Düsseldorf] : Werner, 2005 (Werner-Ingenieur-Texte). – ISBN 3–8041–5003–9
- [37] YALCIN, O. ; SAYAR, A. ; ARAR, O. F. ; AKPINAR, S. ; KOSUNALP, S. : Approaches of Road Boundary and Obstacle Detection Using LIDAR. In: *IFAC Proceedings Volumes* 46 (2013), Nr. 25, S. 211–215. <http://dx.doi.org/10.3182/20130916-2-TR-4042.00025>. – DOI 10.3182/20130916-2-TR-4042.00025. – ISSN 14746670

Anhang

Vergleich der Sensorkonfigurationen vom FASCarE und TIAMO

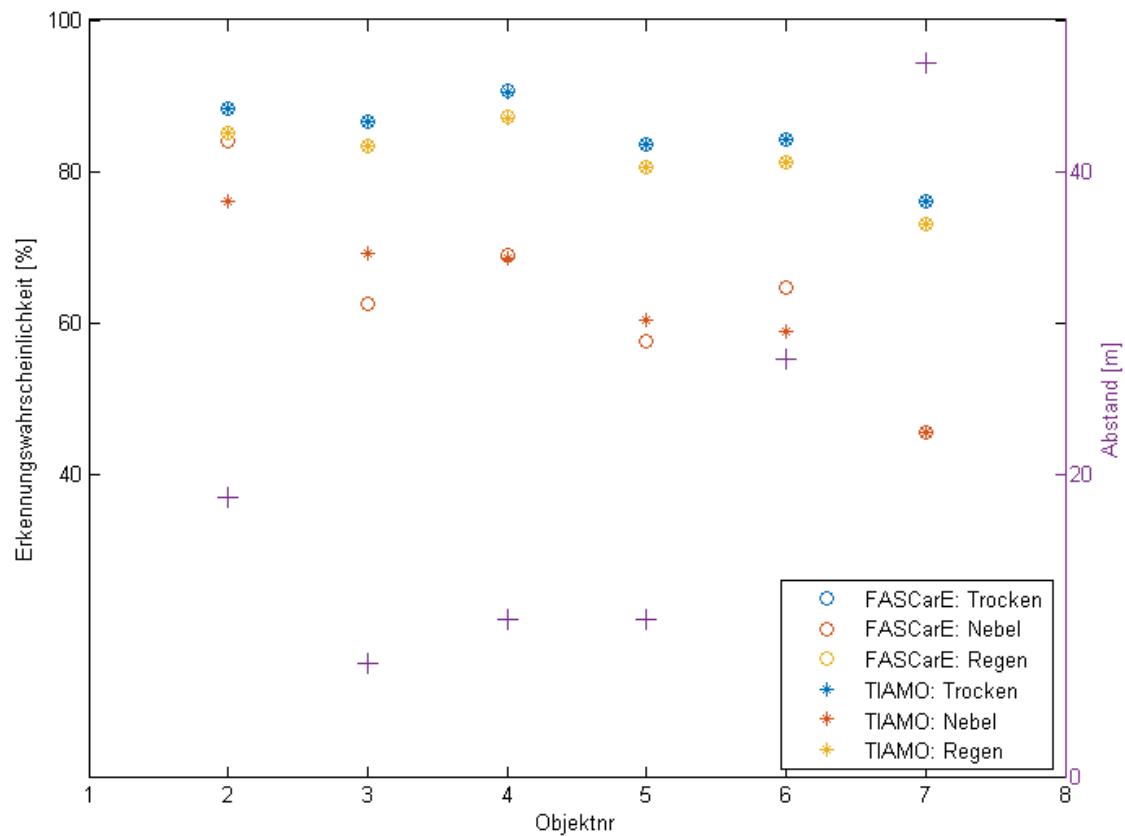


Abbildung 39: Vergleich der Erkennungswahrscheinlichkeiten vom FASCarE und TIAMO bei Nacht zu unterschiedlichen Witterungen

Forschungskreuzung

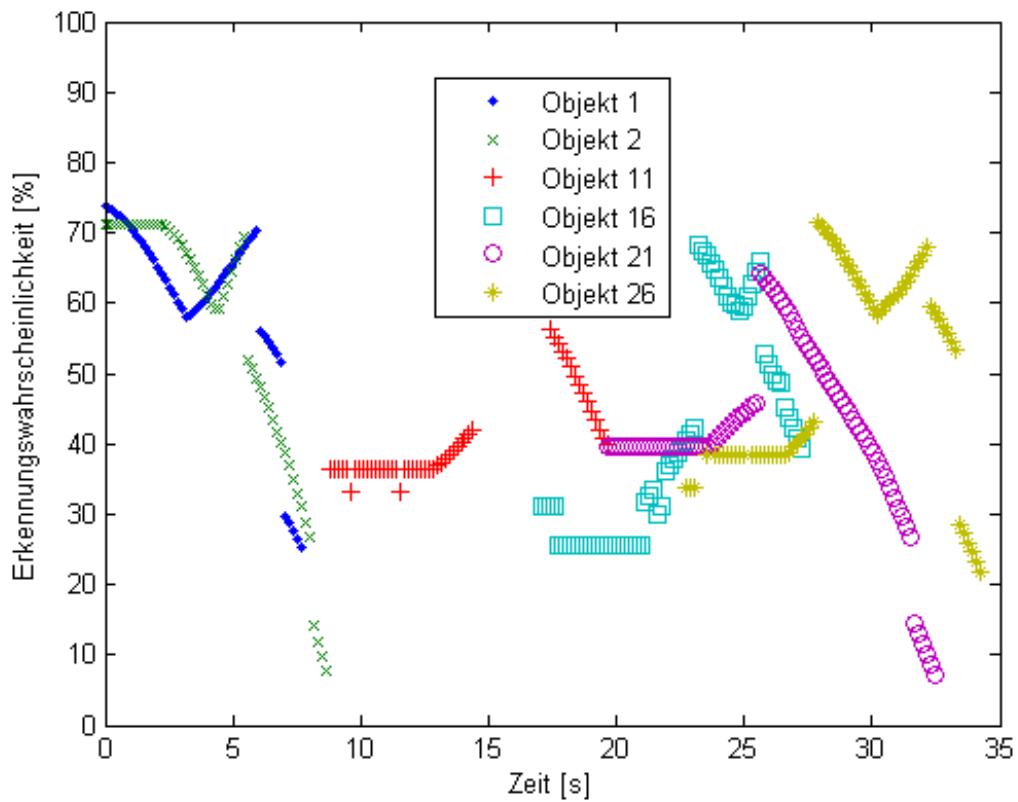


Abbildung 40: Erkennungswahrscheinlichkeiten der Forschungskreuzung von sechs Objekten bei Nebel

Sensorspezifikationen

Tabelle 10: Spezifikationen einer Auswahl von Sensoren

Sensor	ϕ_H/ϕ_V [°]	R_{min}/R_{max} [m]	$\Delta\phi_H$ [°]	Tol [±m]	T_{Mess} [ms]	Hersteller
Ultraschall	120/60	0.15/1.5	10	-	1	-
Ultraschall	140/70	0.15/5.5	10	-	1	Bosch
Ultraschall	50/50	0.15/5	10	-	1	-
Radar	17/23.1	0.8/50	1	0.36	66	-
Radar	18/23.1	0.2/120	3.3	0.36	60	Continental
Radar	90/23.1	0.2/40	6.6	0.36	60	Continental
Radar	12/23.1	0.36/0.72	7	0.12	60	Bosch
Radar	10/23.1	0.36/0.72	7	0.12	60	Bosch
Radar	150/23.1	0.36/0.72	7	0.12	60	Bosch
Radar	20/4.5	1/60	5.3	0.5	50	Delphi
Radar	90/4.5	1/174	5.3	0.5	50	Delphi
Radar	150/10	0.5/80	5.3	0.36	50	Delphi
Radar	36/8	1/160	5.3	0.25	50	SmartMicro
Radar	70/10	1/90	5.3	0.25	50	SmartMicro
Radar	100/10	1/45	5.3	0.25	50	SmartMicro
Radar	36/12	1.5/450	5.3	0.25	79	SmartMicro
Radar	100/36	1.5/340	5.3	0.25	53	SmartMicro
Radar	100/16	1.5/330	5.3	0.25	79	SmartMicro

Spezifikationen einer Auswahl von Sensoren

Sensor	ϕ_H/ϕ_V [°]	R_{min}/R_{max} [m]	$\Delta\phi_H$ [°]	Tol [±m]	T_{Mess} [ms]	Hersteller
Radar	80/24	1/120	5.3	0.25	75	SmartMicro
Radar	80/12	1/120	5.3	0.25	75	SmartMicro
Radar	15/130	0.4/55	5.3	0.55	50	SmartMicro
Radar	66/23.1	0.82/70	5.3	0.36	60	SmartMicro
Radar	140/23.1	0.82/8	5.3	0.36	60	SmartMicro
Radar	16/23.1	0.82/120	5.3	0.36	60	SmartMicro
Radar	36/23.1	0.8/99	5.3	0.36	60	Jenoptik
Radar	165/23.1	0.75/70	5.3	1.50	50	Hella
Lidar	180/20.2	0.6/100	0.31	0.05	99	-
Lidar	27/11	1/13.5	0.31	0.1	80	Continental
Lidar	110/3.2	0.3/200	0.125	0.05	80	Ibeo
Lidar	110/3.2	0.3/120	0.125	0.05	160	Ibeo
Lidar	110/6.4	0.3/200	0.125	0.05	40	Ibeo
Lidar	145/3.2	0.3/327	0.25	0.05	25	Ibeo
Lidar	270/20.2	0.1/80	0.25	0.03	25	Hokuyo
Lidar	270/20.2	0.06/5	0.5	0.04	25	Hokuyo
Lidar	270/20.2	0.02/20	0.25	0.04	50	Hokuyo
Lidar	190/20.2	0.1/80	0.25	0.05	20	Hokuyo
Lidar	95/20.2	0.6/100	0.563	0.05	10	Leddartech
Lidar	20/3	0.6/60	2.5	0.05	333	Leddartech

Spezifikationen einer Auswahl von Sensoren

Sensor	ϕ_H/ϕ_V [°]	R_{min}/R_{max} [m]	$\Delta\phi_H$ [°]	Tol [±m]	T_{Mess} [ms]	Hersteller
Lidar	360/70	0.6/160	0.31	0.05	333	Ocular
Lidar	360/70	0.6/270	0.31	0.05	200	Ocular
Lidar	360/30	1/100	0.2	0.05	200	Velodyne
Lidar	360/40	1/100	0.2	0.05	200	Velodyne
Lidar	360/26.9	1/120	0.17	0.05	50	Velodyne
Lidar	90/20.2	1.6/250	0.023	0.05	50	Triple-IN
Lidar	90/20.2	0.6/170	0.023	0.05	200	Triple-IN
Lidar	90/20.2	2.1/300	0.023	0.05	99	Triple-IN
Lidar	270/20.2	0.8/160	0.045	0.05	40	Triple-IN
Lidar	270/20.2	2/200	0.045	0.05	66	Triple-IN
Lidar	360/45	0.6/1000	0.31	0.05	80	Neptec
Lidar	270/20.2	0.5/50	0.25	0.05	80	SICK
Lidar	270/20.2	0.05/8	1	0.05	80	SICK
Lidar	275/7.5	0.2/64	0.25	0.05	100	SICK
Lidar	110/3.2	0.5/300	0.125	0.05	40	SICK
Lidar	110/3.2	0.5/300	0.125	0.05	80	SICK
Lidar	120/15	0.5/75	0.13	0.05	33	SICK
Lidar	190/20.2	0.5/40	0.167	0.025	99	SICK
Lidar	190/20.2	0/80	0.25	0.025	13	SICK
Lidar	110/3.2	0.6/90	0.25	0.1	99	Ibeo LUX

Spezifikationen einer Auswahl von Sensoren

Sensor	ϕ_H/ϕ_V [°]	R_{min}/R_{max} [m]	$\Delta\phi_H$ [°]	Tol [±m]	T_{Mess} [ms]	Hersteller
Kamera (sichtbar)	50/28	1/120	0	-	33	Bosch
Kamera(sichtbar)	97/74	1/77.5	1	-	50	AVT
Kamera(FIR)	9/6.7	1/285	1	-	33	Riva
Kamera(FIR)	24/18	1/100	1	-	33	Riva
Kamera(FIR)	41.8/31.4	1/60	1	-	33	Riva
Kamera(FIR)	17.6/13.2	1/285	1	-	0.1	Riva
Kamera(FIR)	37.5/28	1/140	1	-	31	Riva
Kamera(FIR)	49.8/37	1/100	1	-	33	Riva
Kamera(NIR)	100/54	1/35	1	-	50	Riva
Kamera(NIR)	42.6/34.7	1/77.5	1	-	50	AVT
Kamera(NIR)	97/74	1/77.5	1	-	50	AVT