



Simulation von infrastrukturellen Umfelderfassungslösungen zur Systemkonzeptbewertung

Masterarbeit

erstellt von cand. mach. Viviane Bremer
Braunschweig, der 23. Januar 2019

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

Aufgabenstellung (Original bzw. Kopie)

Sperrklausel

Die Ausgabe der vorliegenden Bachelor/Master/Studien/Projektarbeit mit dem Titel ist ausschließlich unter Genehmigung der Institutsleitung zulässig.

Ort, den Datum

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere an Eides statt, dass ich die vorliegende Bachelor/Master/Studien/Projektarbeit mit dem Titel, ohne unerlaubte fremde Hilfe oder Beratung und nur unter Verwendung der angegebenen wissenschaftlichen Hilfsmittel angefertigt habe.

Ort bei Unterschrift, den Datum bei Unterschrift

Name des Autors

Kurzfassung

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	X
Abkürzungsverzeichnis	XI
Symbolverzeichnis	XII
1 Einleitung	1
2 Umfelderkennung	2
2.1 Sensoren zur Umfelderkennung	2
2.1.1 Ultraschall	2
2.1.2 Radar	4
2.1.3 Lidar	6
2.1.4 Kamera	8
2.2 Datenverarbeitung	9
2.2.1 Objekterkennung	9
2.2.2 Tracking	11
2.2.3 Sensordatenfusion	12
2.3 Sensoreinsatz	14
2.3.1 Im Fahrzeug	14
2.3.2 In der Infrastruktur	17
3 Anforderungen an ein Software-Tool zur Sensorbewertung	22
4 Software-Tool zur Sensorbewertung	23
4.1 Programmstruktur/Architektur	23
4.2 Implementierung	23
5 Evaluation	24
6 Zusammenfassung und Ausblick	25
Literatur	26

Abbildungsverzeichnis

1	Veranschaulichung des Trilaterationsprinzips für ein rundes Objekt . . .	3
2	Beispielhafter Frequenzverlauf von FMCW (a) und Chirp Frequency Modulation (b) [WHLS15]	4
3	Schematische Darstellung des Scanning Verfahrens (a) und des Monopuls Verfahrens (b) [WHLS15]	6
4	Schematischer Ablauf der Datenverarbeitung [WHLS15]	9
5	Beispiel für den Vergleich von Region-Growing (grün) und Linienextraktion (blau). Die roten Punkte sind die Laserscannerrohdaten [Leo08]	10
6	Beispielhafte Darstellung der Bildgradienten (links) und der Histogramme der Gradientenrichtung (rechts) [WHLS15]	10
7	Ansätze der Datenaufnahme für die Datenfusion	13
8	Implizite Sensordatenfusion mit asynchronen Sensoren [Kla05]	13
9	Explizite Sensordatenfusion mit synchronen Sensoren [Kla05]	14
10	Grafische Darstellung der einzelnen Automatisierungsgrade	15
11	Beispielhafte Darstellung der Umfelderkennungssensoren am Fahrzeug	16
12	Die Forschungskreuzung des Testfeldes AIM in Braunschweig. Blau: Sichtbereich zweier Monokameras kombiniert mit einem 24GHz Radar und einem IR-Blitz. Grün: Sichtbereich eines Stereokamerasystems mit einem IR-Blitz [BDH ⁺ 18]	18
13	Sensoraufbau der Ko-PER Kreuzungen in Aschaffenburg. Gelb: Sichtbereich der Laserscanner. Grün: Sichtbereich der Kameras [Mic] . . .	19

Tabellenverzeichnis

1	Einsatz von Sensoren im Fahrzeug	20
2	Einsatz von Sensoren in der Infrastruktur	21

Abkürzungsverzeichnis

Symbolverzeichnis

Δh_{ax}	$[\text{m/s}^2]$	Überschwingweite
------------------------	------------------	------------------

1 **Einleitung**

2 Umfelderkennung

Dieses Kapitel stellt zunächst Sensoren zur Umfelderkennung vor und erläutert deren Funktionsprinzipien. Anschließend wird auf die Sensordatenverarbeitung eingegangen. Dazu gehören die Datenfusion, die Objekterkennung und das Tracking. Auf diesen Grundlagen aufbauend werden in den Abschnitten 2.3.1 und 2.3.2 Anwendungen im Fahrzeug und in der Infrastruktur erläutert.

2.1 Sensoren zur Umfelderkennung

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

2.1.1 Ultraschall

Als Ultraschall werden die Schallfrequenzen ab 20kHz bezeichnet. 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 [WHL15]. 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 [TR14]:

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

Da die Strecke zwischen Sender und Objekt zweimal durchlaufen wird, muss sie halbiert werden um den tatsächlichen Abstand zu erhalten. Neben der reinen Abstandsmessung kann mit Hilfe von zwei Sendern, deren Erfassungsbereiche überlappen,

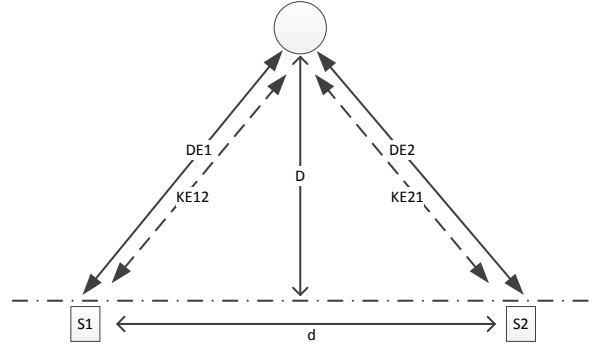


Abbildung 1: Veranschaulichung des Trilaterationsprinzips für ein rundes Objekt

auch eine Positionsbestimmung durchgeführt werden. Hierzu wird das Trilaterationsverfahren genutzt. Für ein rundes Objekt ist dies in Abbildung 1 dargestellt. Der Abstand D berechnet mittels der Direktechos DE und des Satzes von Pythagoras:

$$D = \sqrt{DE1^2 - \frac{(d^2 + DE1^2 - DE2^2)^2}{4d^2}} \quad (2)$$

Mit Hilfe des Kreuzechos KE kann des Weiteren bestimmt werden, ob es sich um ein rundes Objekt handelt oder um eine Wand. Für ein rundes Objekt ergibt sich das Kreuzecho KE zu

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

und für eine Wand zu

$$KE_{Wand} = \sqrt{\frac{d^2}{4} + DE1 \times DE2}. \quad (4)$$

Die Reichweite des Ultraschallsensors ist abhängig von der ausgesendeten Schallintensität I_S , die in Abhängigkeit von der Entfernung D des gemessenen Objektes abnimmt. Somit ergibt sich mit der effektiven Reflexionsfläche σ und bezogen auf den Normabstand D_1 die reflektierte Schallintensität

$$I_{refl} = \sigma I_S \left(\frac{D_1}{2D} \right)^2. \quad (5)$$

Des Weiteren verringern der Reflexionsgrad ρ_S und die Impedanz der Atmosphäre die Schallintensität bei der Reflexion. Als untere Grenze zur Objektmessung muss die Schallintensität des Empfangssignals oberhalb des Messrauschens liegen, d.h. $\geq 10\text{dB}$ sein.

2.1.2 Radar

Die Radarmessung (Radio Detection And Ranging) gehört zu den berührungslosen Messverfahren und wird insbesondere bei anspruchsvollen Umgebungsbedingungen eingesetzt [TR14]. Bei diesem Verfahren werden elektromagnetische Wellen im Mikrowellenbereich eingesetzt, welche kaum anfällig gegenüber Temperaturschwankungen und Nebel sind. Für den Automobilbereich sind die Frequenzen 24GHz und 77GHz reserviert [WHLS15]. Das 24GHz-Band wird für das Short Range Radar (SRR) genutzt und das 77GHz-Band für das Long Range Radar (LRR).

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

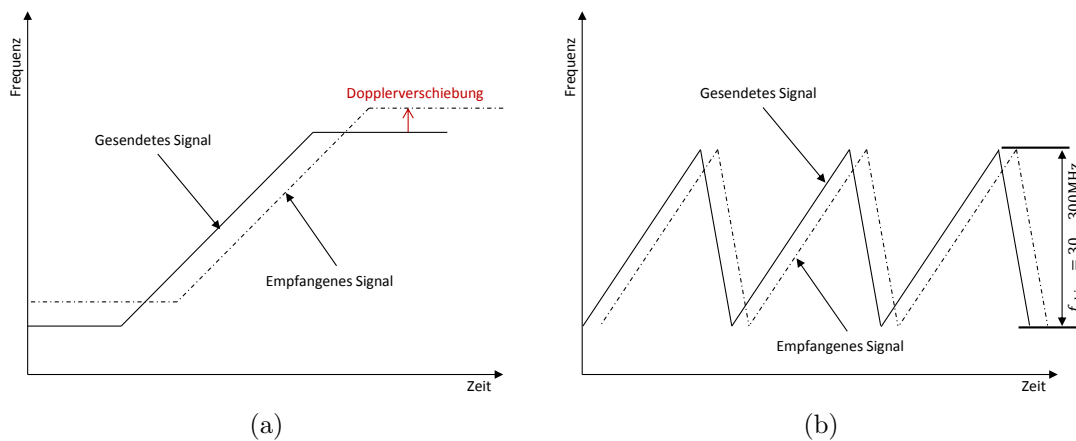


Abbildung 2: Beispielhafter Frequenzverlauf von FMCW (a) und Chirp Frequency Modulation (b) [WHLS15]

Das Dauerstrichradar erzeugt durch die kontinuierliche und rampenförmige Veränderung der Momentanfrequenz mit der Treppensteigung m_ω eine konstante Phasenverschiebung von $+(2r/c)^2 m_\omega$. Der Abstand und die Geschwindigkeit wird bei diesem Verfahren mithilfe der Frequenzverschiebung bestimmt:

$$r = \frac{c}{2} \cdot \frac{\omega_{obj,1} - \omega_{obj,2}}{m_{\omega,1} - m_{\omega,2}}, \quad (6)$$

$$\dot{r} = \frac{c}{2\omega_0} \cdot \frac{m_{\omega,1}\omega_{obj,1} - m_{\omega,2}\omega_{obj,2}}{m_{\omega,1} - m_{\omega,2}}. \quad (7)$$

Mit der Startkreisfrequenz ω_0 und der Kreisfrequenz $\omega_{obj} = \frac{2}{c}(m_\omega r + \omega_0 \dot{r})$.

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

$$r = \frac{1}{2} c_L t_{of} \quad (8)$$

$$\dot{r} = -\frac{c_L}{2} \frac{f_{Doppler}}{f_0} \quad (9)$$

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

Die Reichweite des Radars ist abhängig von der Sendeleistung und der Richtcharakteristik der Antenne. Je nach Richtcharakteristik ergibt sich der Antennengewinn G , der Einfluss auf die Reichweite nimmt. So ergibt sich die Empfangsleistung für ein reflektiertes Radarsignal zu

$$P_R = \frac{10^{-2kr/1000} \sigma \lambda^2 G^2 V_{mp}^2 P_{total}}{(4\pi)^3 r^4} \quad (10)$$

mit dem Rückstreuquerschnitt des Objektes

$$\sigma_{plate} = 4\pi \frac{A^2}{\lambda^2}. \quad (11)$$

Gleichung 10 berücksichtigt außerdem sogenannte Signalleistungsschüttler mit dem Faktor V_{mp}^2 , $0 \leq V_{mp} \leq 2$.

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

Das zweite 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.

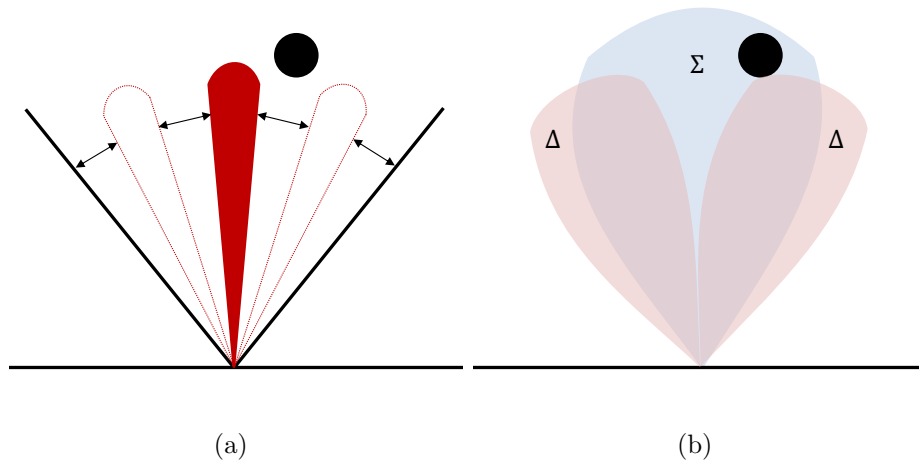


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Scanning Verfahrens (a) und des Monopuls Verfahrens (b) [WHLS15]

2.1.3 Lidar

Light Detection and Ranging, kurz Lidar, gehört zu den optischen Messverfahren und nutzt UV-, IR-Strahlen oder Strahlen aus dem sichtbaren Spektrum [WHLS15].

Für die Abstandsmessung wird die Pulslaufzeitmessung genutzt, bei dem kurze Lichtblitze hoher Leistung, meist Laser-Pulse, gesendet und die Laufzeit gemessen wird [TR14]. Der Abstand wird analog zum Ultraschall bestimmt:

$$d = \frac{c_L \Delta t}{2} \quad (12)$$

Mit der Lichtgeschwindigkeit c_L . Die Reichweite beim Lidar ist durch die Lichtintensität, welche den Laserschutzvorschriften genügen muss, beschränkt. Des Weiteren beeinflusst auch der Reflexionsgrad ρ_L die Reichweite. Dieser ist insbesondere von der Oberfläche des Objektes abhängig, aber auch von seiner Größe. So ergibt sich für die reflektierte Lichtintensität $P_{r,gro\beta}$ für ein großes bzw. nahes Objekt die folgende Gleichung:

$$P_{r,gro\beta} = \frac{\rho_L \cdot A_t \cdot H \cdot T^2 \cdot P_t}{\pi^2 \cdot R^3 \cdot (Q_v/4)(\Phi/2)^2} \quad (13)$$

Für ein Objekt, das – aufgrund der Entfernung – kleiner ist als der Lichtpunkt, ändert sich Gleichung 13 zu:

$$P_{r,klein} = \frac{\rho_L \cdot A_t \cdot H \cdot T^2 \cdot P_t}{\pi^2 \cdot R^4 \cdot (Q_v Q_h/4)(\Phi/2)^2}. \quad (14)$$

Hierbei ist Φ der Winkel der Objektreflexion, H die Objektbreite, A_t die Empfangslinsenfläche, T die Transmission der Atmosphäre, Q_v und Q_h die vertikale bzw. horizontale Strahldivergenz und P_t die Laserleistung.

Das Sichtfeld kann von dem eindimensionalen Fall mit einem Strahl in nur eine Richtung auch horizontal und vertikal beliebig erweitert werden. Dafür gibt es zwei verschiedene Ansätze. Ein Ansatz ist der Einsatz eines schwenkbaren Spiegels, der den Laserstrahl umlenkt. Hierdurch ist ein horizontaler Öffnungswinkel von bis zu 360° und ein vertikaler Öffnungswinkel von bis zu 120° möglich. Der zweite Ansatz nutzt ein Array aus Laserdioden, die mittels Multiplexverfahren angesteuert werden. Der horizontale Öffnungswinkel bei dieser Variante beträgt bis zu 110° . Der vertikale Öffnungswinkel ist von der Strahlbreite abhängig und beträgt in etwa 2° bis 5° .

2.1.4 Kamera

Die Kamera gehört zu den bildgebenden Sensoren und besitzt dadurch den Vorteil, ähnliche Informationen wie das menschliche Auge zu produzieren [WHLS15]. Somit können Objekte mit einer hohen Genauigkeit identifiziert werden. Die Entfernungsmessung mit einer einzelnen Kamera ist hingegen ungenau, da nur anhand der Auflösung geschätzt werden kann. Auch der Sichtbereich und die Reichweite sind von der Auflösung abhängig. Letzteres wird durch den Bereich des scharfen Abbildens begrenzt [HMS16]. Die untere Grenze a_v der Reichweite liegt vor und die obere Grenze a_h hinter der Objektebene. Sie ergeben sich mit

$$a_v = \frac{af'^2}{f'^2 - u'k(a + f')} \quad (15)$$

$$a_h = \frac{af'^2}{f'^2 + u'k(a + f')}. \quad (16)$$

Dabei ist k die Blendenzahl, a der Abstand zwischen Objektebene und Eintrittspupille, f' die Brennweite und u' der Durchmesser des Unschärfekreises, der sich folgendermaßen bestimmen lässt:

$$u' = \frac{\text{Formatdiagonale}}{1000} \quad (17)$$

Neben dem sichtbaren Spektrum können einige Kameras auch das Infrarotspektrum abbilden. Dadurch ist der Einsatz in der Nacht bzw. Dunkelheit möglich. Es gibt zwei verschiedene Ansätze hierbei, die unterschiedliche Infrarotbereiche nutzen [WHLS15]. Eine Möglichkeit ist das Nahinfrarot (NIR). Hierbei wird die Szene mit NIR-Strahlung ausgeleuchtet, dessen Reflexion von der Kamera erkannt wird. Die andere Möglichkeit ist der Einsatz von Ferninfrarot (FIR). In diesem Spektrum liegt die Wärmestrahlung von Objekten, die von speziellen Wärmebildkameras erfasst werden kann. Ein aktives Beleuchten der Szene entfällt somit.

2.2 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 4 schematisch dargestellt.

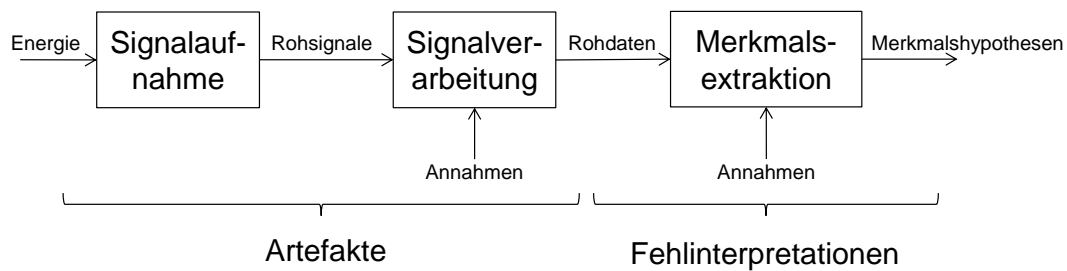


Abbildung 4: Schematischer Ablauf der Datenverarbeitung [WHLS15]

Als erstes wird die Signalaufnahme mittels des Sensors 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.

2.2.1 Objekterkennung

Bei der Objekterkennung ist die Wahl des Verfahrens maßgeblich abhängig vom Sensortyp. So werden für Radar und Lidar z.B. Segmentierungsverfahren eingesetzt und für Kamera 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 5. Nach diesem Schritt werden die Segmente in I- und L-Formen unterschieden. Unter Verwendung der Segmentabmessungen kann schließlich die Objektklasse bestimmt werden [Leo08].



Abbildung 5: Beispiel für den Vergleich von Region-Growing (grün) und Linienextraktion (blau). Die roten Punkte sind die Laserscannerrohdaten [Leo08]

Bei der Kamera werden Gradientenverfahren und Matching Verfahren zur Merkmalsextraktion eingesetzt [WHLS15]. Die wichtigsten Merkmale beim Kamerabild sind Kanten und Ecken. Diese führen zu einer deutlichen Änderung des Bildsignals, welche mathematisch durch Gradienten beschrieben wird. Diese können in Histogramme der Gradientenrichtung überführt werden, siehe Abbildung 6.

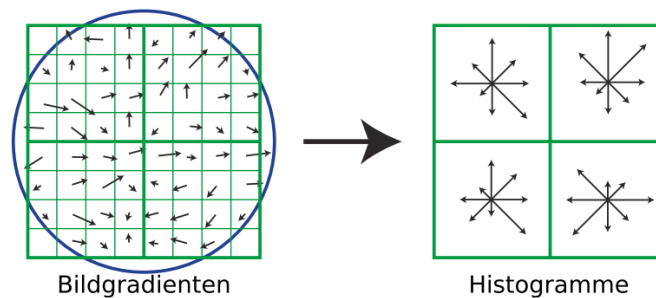


Abbildung 6: Beispielhafte Darstellung der Bildgradienten (links) und der Histogramme der Gradientenrichtung (rechts) [WHLS15]

Beim Matching Verfahren wird eine kleine Region um einen Bildpunkt herum mit den entsprechenden Punkten im nächsten Bild verglichen. Um nicht den gesamten Bildraum abzusuchen, wird das Verfahren auf Ecken und Kanten im Bild angewendet.

2.2.2 Tracking

Für das Tracking werden insbesondere drei verschiedene Verfahren eingesetzt. Das sind der Bayes-Filter, der Kalman-Filter und der Partikelfilter [WHLS15]. 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

$$X_k = f_k(X_{k-1}, s_k) \quad (18)$$

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

$$Y_k = g_k(X_k, v_k) \quad (19)$$

beschrieben. v_k ist dabei die Realisierung des stochastischen Beobachtungsrauschens 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. Die rekursive Gleichung für die Wahrscheinlichkeitsdichte des Bayes-Filters lautet folgendermaßen:

$$p(X_k|Y_0, \dots, Y_{k-1}) = c \cdot p(Y_k|X_k) \cdot \int p(X_k|X_{k-1}) p(X_{k-1}|Y_0, \dots, Y_{k-1}) dX_{k-1} \quad (20)$$

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:

$$\hat{X}_k^- = F \hat{X}_{k-1} \quad (21)$$

$$\hat{P}_k^- = F \hat{P}_{k-1} F^T + P_S \quad (22)$$

Dabei ist F die Dynamikmatrix und P_S die Kovarianzmatrix des Systemrauschens. Danach wird schließlich die neueste Beobachtung Y_k mit der Beobachtungsmatrix G und der Kovarianzmatrix des Beobachtungsrauschens P_V berücksichtigt.

$$\hat{X}_k = \hat{X}_k^- + \hat{P}_k^- G^T \left(P_V + G \hat{P}_k^- G^T \right)^{-1} \left(Y_k - G F \hat{X}_{k-1} \right) \quad (23)$$

$$\hat{P}_k = \hat{P}_k^- - \hat{P}_k^- G^T \left(P_V + G \hat{P}_k^- G^T \right)^{-1} G \hat{P}_k^- \quad (24)$$

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.

2.2.3 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. Im Allgemeinen werden die Ansätze in komplementär, konkurrierend und kooperativ unterschieden. Die Bedeutung für den Sensoreinbau ist in Abbildung 7 dargestellt. Werden Sensoren komplementär genutzt, so ergänzen sich deren einzelne Sichtfelder zu einem großen. Sind Sensoren konkurrierend verbaut, sind sie entweder redundant, d.h. es wird die gleiche Information generiert, oder konträr, d.h. es werden gegensätzliche Informationen erzeugt. Der letzte Ansatz ist der kooperative Einsatz von unterschiedlichen Sensoren, die zusammen einen höheren Informationsgehalt erzeugen [Kla05].

Für die Sensordatenfusion gibt es zwei wesentliche Ansätze, siehe Abbildungen 8 und 9. Entweder werden die Daten implizit oder explizit fusioniert. Bei der impliziten Fusion werden die Sensordaten zeitlich nacheinander eingebracht. Dadurch wird eine zeitlich konsistente Datenverarbeitung nötig. Außerdem muss eine zeitliche Filterung durchgeführt werden, wenn die Messdaten vorliegen. Es wird jedoch schon eine Assoziation auf dem sensorspezifischen Abstraktionslevel durchgeführt, die bei der Fusion abgeglichen wird. Vorteilhaft bei der impliziten Fusion ist, dass keine Synchronisierung der Sensoren durchgeführt werden muss.

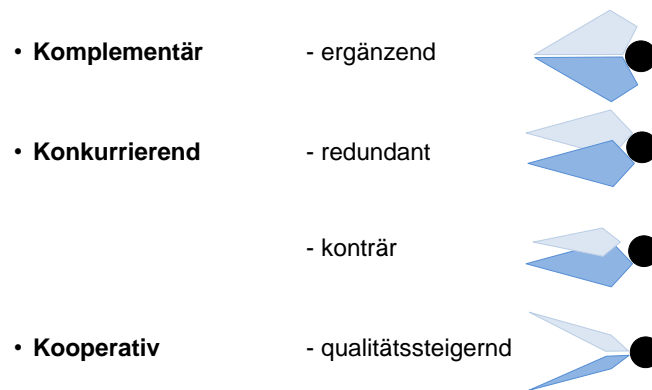


Abbildung 7: Ansätze der Datenaufnahme für die Datenfusion

Werden asynchrone Sensoren bei der Datenfusion verwendet, müssen die Daten sequentiell eingebracht werden. Somit ist der Algorithmus nicht deterministisch. Zudem 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 die Assoziation mitberücksichtigt werden. Je ähnlicher die Latenzzeiten der einzelnen Sensoren sind, desto geringer wird schließlich auch der Fehler der Schätzung.

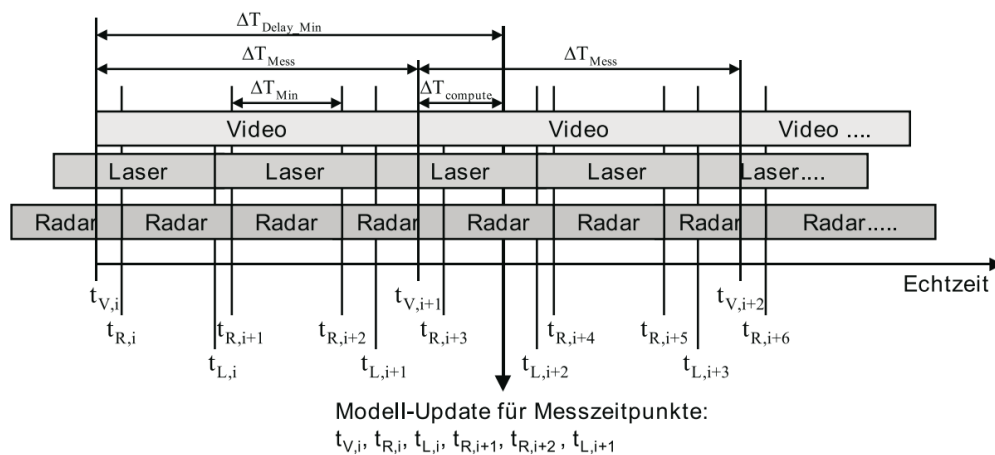


Abbildung 8: Implizite Sensordatenfusion mit asynchronen Sensoren [Kla05]

Bei der expliziten Fusion 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.

Die Datenfusion mit synchronen Sensoren führt zu einer sicheren und zuverlässigen Assoziation. Da jedoch der Sensor mit der längsten Akquisitionszeit den zeitlichen Versatz zwischen Messung und Assoziation bestimmt, ist der Algorithmus streng deterministisch und es kommt zu einem hohen Verzug zwischen Realwelt und Modell ΔT_{Delay_Min} . Die Arbeit mit synchronisierten Sensoren bietet jedoch neben der sicheren Assoziation eine einfache Erweiterbarkeit um weitere Sensoren.

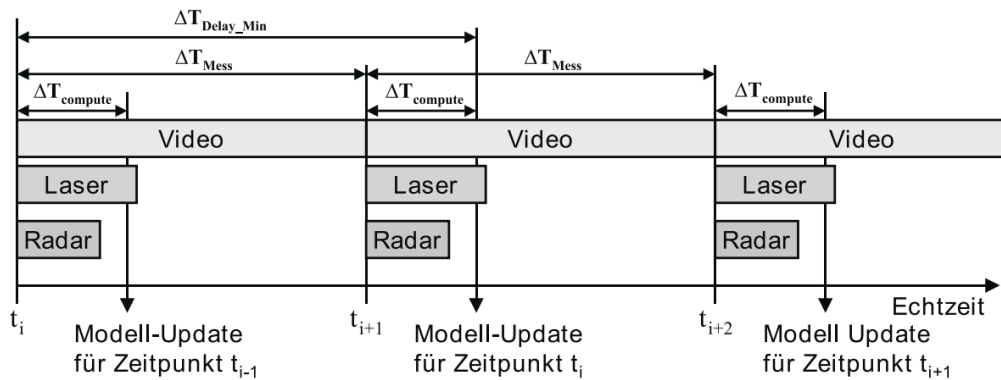


Abbildung 9: Explizite Sensordatenfusion mit synchronen Sensoren [Kla05]

2.3 Sensoreinsatz

Die in Abschnitt 2.1 vorgestellten Sensoren werden im automotiven Kontext für die Automatisierung des Verkehrs genutzt. Das Ziel ist die Mobilität energieeffizient, komfortabel, sicher und verkehrseffizient zu gestalten [BDH⁺18]. Wie sie in den Fahrzeugen und in der Infrastruktur eingesetzt werden, um dies zu erreichen, wird in den folgenden Abschnitten erläutert.

2.3.1 Im Fahrzeug

Die Automatisierung des Fahrzeugs erfolgt schrittweise. Hierfür unterscheidet die Bundesanstalt für Straßenwesen in fünf Automatisierungsgrade [Tom]. Diese sind in Abbildung 10 dargestellt. Um die letzte Stufe, das autonome Fahren, zu erreichen,

muss das Fahrzeug seine Umgebung vollständig erfassen und bewerten können. Nur so kann selbstständig ein Manöver ausgewählt und durchgeführt werden.

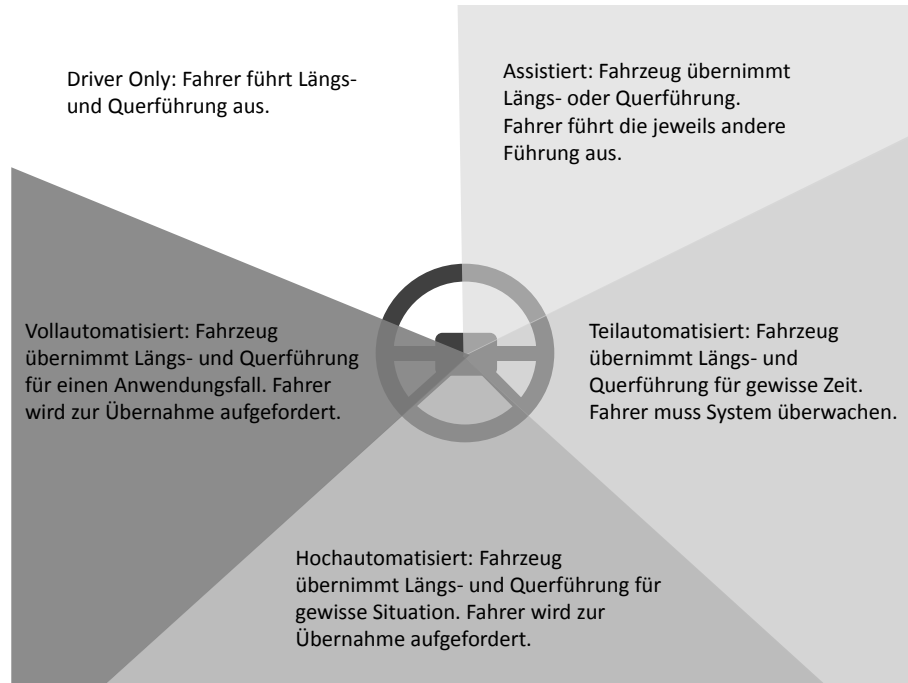


Abbildung 10: Grafische Darstellung der einzelnen Automatisierungsgrade

Heutzutage werden Serienfahrzeuge mit Sensoren zur Umfelderkennung für die Unterstützung des Fahrers ausgerüstet [WHLS15]. In Abbildung 11 ist eine mögliche Anordnung für eine 360°-Wahrnehmung des Fahrzeuges dargestellt. Zu erkennen ist, dass das Long Range Radar und das Lidar in Fahrtrichtung genutzt wird. Dies begründet sich in ihrer hohen Reichweite. So wird ein großer Sichtbereich in Fahrtrichtung abgedeckt. Sensoren mit einer geringeren Reichweite werden eingesetzt, um das nähere Umfeld zu beobachten. Hierzu gehören das Short Range Radar, die Kamera und der Ultraschall.

Das Long Range Radar und das Lidar wird im Rahmen von Fahrerassistenzsystemen z.B. für ein Adaptive Cruise Control (ACC) genutzt. Zum Teil werden sie außerdem mit einer Kamera für die Fahrstreifenerkennung kombiniert. So kann der Fahrer beispielsweise bei einer Autobahnfahrt entlastet werden. Es wird hierbei eine Wunschgeschwindigkeit eingestellt, die bis zu einer Annäherung an ein weiteres Fahrzeug gehalten wird. Mit Hilfe der Fahrstreifenerkennung kann außerdem die Querverführung

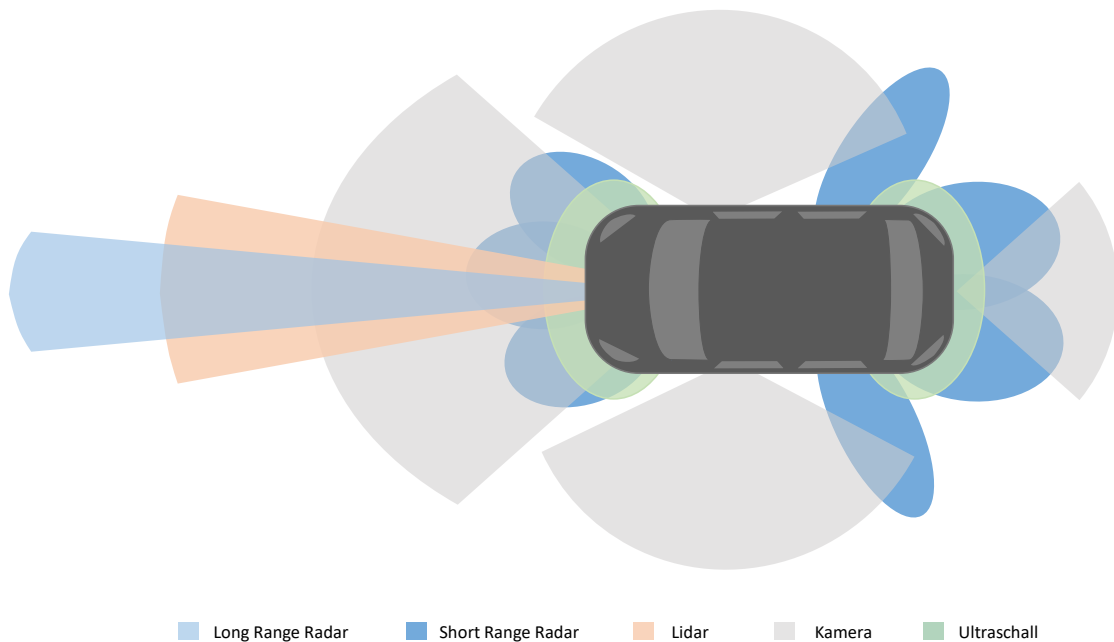


Abbildung 11: Beispielhafte Darstellung der Umfelderfassungssensoren am Fahrzeug

übernommen werden. Die Sensoren für das nähere Umfeld werden unter anderem für Spurwechsel-, Toter-Winkel- und Einparkassistenten genutzt. Erstere dienen zur Vermeidung von Unfällen mit seitlich von Hinten herannahenden oder kreuzenden Verkehrsteilnehmern. Letztere erleichtern das Einparken oder übernehmen es zum Teil ganz.

Damit Fahrzeuge ohne menschliches Eingreifen zukünftig fahren können, wird viel an der Umfelderfassung geforscht. Eine Auswahl an Arbeiten ist in Tabelle 1 aufgeführt. Zum einen muss das statische Umfeld erfasst werden und zum anderen das dynamische. Zu ersterem gehören unter anderem der Verlauf der Fahrstreifen, Kreuzungen und statische Objekte wie Baustellen, Verkehrsschilder oder Brücken. Alle dynamischen Objekte wie LKWs, PKWs, Fahrradfahrer und Fußgänger gehören zum dynamischen Umfeld. Auch der Status von Lichtsignalanlagen oder die Witterung gehören hierzu. Somit werden z.B. Verfahren erforscht, um mittels Radar Fußgänger detektieren zu können [ATK10], [BFR12]. Dies ist aufgrund ihres geringen Querschnittes und der geringen Winkelauflösung des Radars schwierig. Des Weiteren werden Verfahren entwickelt, die Infrarotkameras nutzen [NHF15], [WL15]. Für die Verbesserung der Datenqualität wird auch an der Sensordatenfusion gearbeitet [Rud09], [ARB13].

Für das vollautomatisierte Fahrzeug spielt neben der Umfeldwahrnehmung die Selbstwahrnehmung und die Selbstlokalisierung eine wichtige Rolle. Bei der Selbstwahrnehmung werden Umfelddaten wie beispielsweise die Witterung genutzt, um die sichere Ausführbarkeit von Handlungsalternativen zu bewerten [RBS⁺]. 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 [Dr 18], [Sch], [BBD⁺13],[LSSH] und [VVM17] zu finden.

Ein weiterer Anwendungsfall von Sensoren am Fahrzeug ist die Untersuchung des Verkehrsteilnehmerverhaltens. Einige Vorgehen werden in [ERM] und [BDH⁺18] vorgestellt. Mit Hilfe dieser Untersuchungen sollen Algorithmen entwickelt werden, die das Verhalten der Verkehrsteilnehmer abschätzen. Dies kann schließlich für die Manöverplanung genutzt werden.

2.3.2 In der Infrastruktur

In der Infrastruktur werden Umfelderfassungssensoren für die Verkehrsbeobachtung genutzt. Die aufgenommenen Daten werden für die Analyse der Verhaltensweisen von Verkehrsteilnehmern und zur Unfallforschung genutzt. So können Verhaltensmuster ermittelt werden, die zu Unfällen führen. Hierbei ist die Interaktion zwischen KFZ bzw. LKW und Fahrrad oder Fußgänger interessant [BDH⁺18]. Außerdem wird der Einfluss der Witterung und der Tageszeit auf das Unfallgeschehen untersucht [J. 09]. Des Weiteren können Verfahren entwickelt werden, die die Intentionen der Verkehrsteilnehmer vorhersehen können. Für die Datenaufnahme werden die Sensoren beispielsweise an Lichtsignalanlagen montiert [Mic], [Mic18], [SMS⁺], [KLGFK16]. Außerdem gibt es mobile Ansätze für die Verkehrsüberwachung, wie z.B. der Einsatz von unbemannten Luftfahrzeugen (ULF) [Kon]. Der Vorteil hierbei ist der größere Blickwinkel und die Möglichkeit beispielsweise Staus aufzunehmen.

Tabelle 2 führt einige Arbeiten auf, die sich mit der Verkehrsbeobachtung beschäftigen. Am häufigsten findet die Kamera hierbei Einsatz, da sie günstig sind und eine große Menge an Daten aufnehmen können. Für die Bestimmung der Positionen wird sie

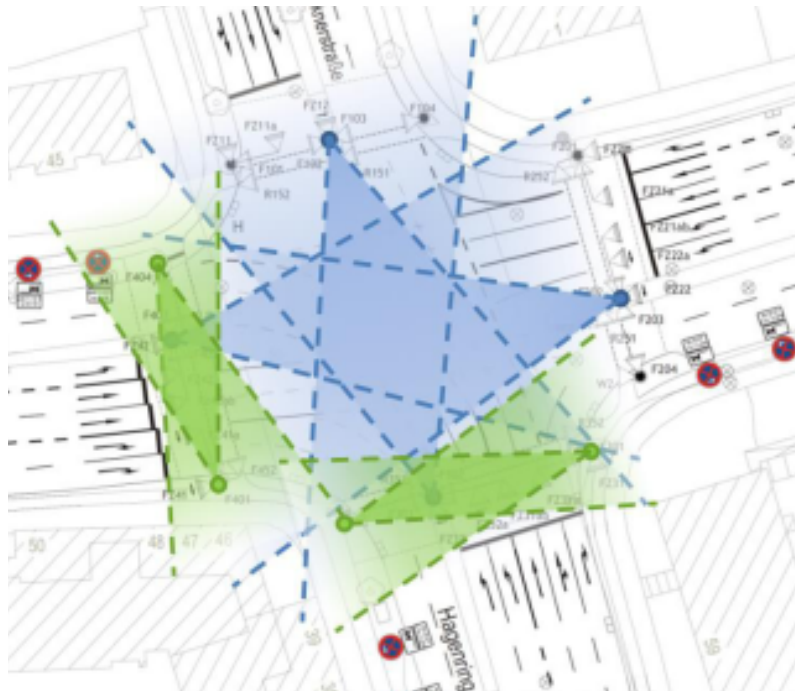


Abbildung 12: Die Forschungskreuzung des Testfeldes AIM in Braunschweig. Blau: Sichtbereich zweier Monokameras kombiniert mit einem 24GHz Radar und einem IR-Blitz. Grün: Sichtbereich eines Stereokamerasystems mit einem IR-Blitz [BDH⁺18]

mit Lidar oder Radar kombiniert. Beispiele für mögliche Versuchsaufbauten sind in den Abbildungen 12 und 13 dargestellt.

Neben der Verhaltensanalyse der Verkehrsteilnehmer soll der Einsatz von Umfelderkennungssensoren der Steuerung des Verkehrs dienen. Hierfür werden die aufgenommenen Daten mittels Car2X-Kommunikation an die Fahrzeuge übermittelt. Welche ihrerseits ihre Daten an die Infrastruktur senden. Dies ermöglicht eine energie- und verkehrseffizientere Routenplanung und eine Reduzierung von Unfällen.

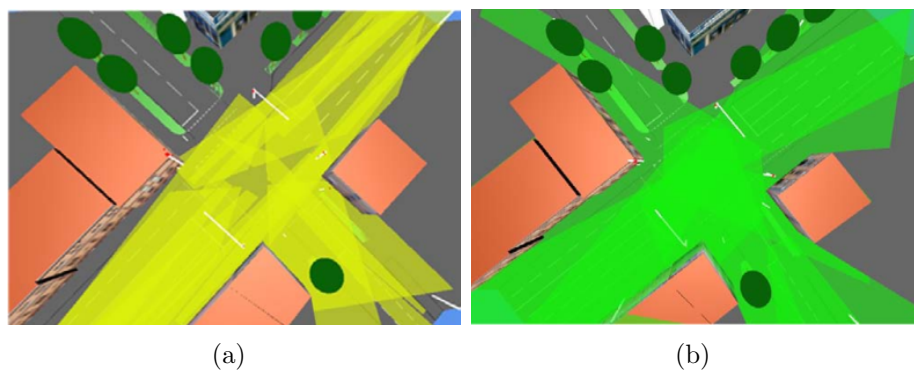


Abbildung 13: Sensoraufbau der Ko-PER Kreuzungen in Aschaffenburg. Gelb: Sichtbereich der Laserscanner. Grün: Sichtbereich der Kameras [Mic]

Quelle	Sensorsetup	Beschreibung	Jahr
[Rud09]	Radar Lidar Kamera	Sensorfusion für Fahrerassistenzsysteme mit hohen Ansprüchen	2009
[PIA10]	Stereokamera	Modell zur Datenanalyse von Stereo Kameras	2010
[ATK10]	2 x Radar	Erkennen eines Menschen mit Radar	2010
[BFR12]	Radar	Erkennen eines Menschen mit Radar	2012
[RBS ⁺]	Radar Lidar	Nutzt Umgebungsmessungen zur Anpassung des Fahrverhaltens bei beispielsweise Regen	2012
[Dr 18]	Lidar GPS	Selbstlokalisierung mit Hilfe von GPS, Laserscanner und digitaler Karte	2013
[YSA ⁺ 13]	Lidar	Positionierung des LIDAR, Fahrbahnbegrenzung erkennen, Objekterkennung	2013
[ARB13]	IR VIS Video	Fusioniert Infrarotkameradaten mit Daten des sichtbaren Spektrums einer Kamera	2013
[Sch]	Kamera Lidar GPS	Erzeugen einer Karte mit Hilfe von aktuellen Messdaten, Selbstlokalisierung des Fahrzeugs	2013
[BBD ⁺ 13]	Lidar Kamera	KFZe ausgerüstet mit Lidar und Kamera, überlappende Sichtbereiche, autonome Fahrt über 13000km durch Europa und Asien	2013
[LSSH]	GPS Gyroscope Kamera Radar	KFZ ausgestattet mit GPS, Gyroscope, Geschwindigkeitsmesser, Kamera, Radar zur Selbstlokalisierung	2014
[NHF15]	IR	Literaturaufstellung bzgl Erkennung von Menschen mit Infrarotsensor	2015
[WL15]	FIR	stellt einen Filter zur Objekterkennung mit Infrarot vor	2015
[ERM]	Lidar	Nutzt digitale Karte und Lidar zur Extraktion von Verkehrsteilnehmern und bestimmt ihr Verhalten	2016
[VVM17]	GPS Gyroscope Kamera	KFZ ausgestattet mit GPS, Gyroscope, Kamera und Laptop zur Selbstlokalisierung	2017

Tabelle 1: Einsatz von Sensoren im Fahrzeug

Quelle	Sensorsetup	Beschreibung	Jahr
[J. 09]	Kamera Lidar IR	CCTV, Laserscanner, IR zur Verkehrs- und Umweltbeobachtung (Bestimmung der Witterung, Tageszeit)	2009
[MRD]	Lidar	Einsatz und Modellierung von Laserscannern an Kreuzungen	2012
[Mic]	Lidar Kamera	Beschreibt den Versuchsaufbau an einer Kreuzung zur Beobachtung des Verkehrs	2012
[HGX12]	Kamera	Vergleicht Algorithmen zur Verhaltenserkennung von Verkehrsobjekten in Kameradaten	2012
[Mic18]	Lidar Kamera	Einsatz von Sensoren an einer Kreuzung (Anbauorte)	2013
[Eli18]	Lidar Kamera	Einsatz von Kameras und Laserscanner an einer Kreuzung zur Beobachtung des Verkehrs	2013
[Kon]	Kamera Radar	Überblick von verschiedenen Studien, die ULFs zur Verkehrsüberwachung nutzen. Ausgestattet mit Kamera/Radar	2013
[SMS ⁺]	Lidar Kamera	Beschreibt den Versuchsaufbau an einer Kreuzung zur Beobachtung des Verkehrs	2014
[JBS]	Kamera	Stellt einen Algorithmus zum Objekttracking für die Bildverarbeitung vor, der an unterschiedlichen Kreuzungen getestet wurde	2014
[DDSV16]	Kamera	Listet und diskutiert Ansätze zur Verkehrsbeobachtung an Kreuzungen	2016
[KLGFK16]	Kamera IR Radar	Stellt die Forschungsplattform AIM zur Untersuchung des Verkehrs vor	2016
[SM17]	GPS Radar Lidar Kamera	Vergleicht verschiedene Ansätze der Verkehrsbeobachtung und Analyse	2016
[BDH ⁺ 18]	Kamera IR Radar	Untersuchung von Konflikten zwischen Fahrradfahrern und motorisierten Fahrzeugen	2017
[Kee]	Radar	Stellt 76-81GHz Radar zur Verkehrsüberwachung vor	2018

Tabelle 2: Einsatz von Sensoren in der Infrastruktur

3 Anforderungen an ein Software-Tool zur Sensorbewertung

- Sensormodell/Sensorattribute
 - FoV (Öffnungswinkel, Reichweite)
 - Datenqualität (Auflösung Genauigkeit, Messdauer)
 - Arbeitsfrequenz
 - Umwelteinflüsse (Witterung, Tag/Nacht, Temperatur)
 - Maße (Größe, Gewicht)
 - Schnittstellen
- Objekte
 - Fahrzeuge (KFZ, LKW, Zweirad)
 - Fußgänger
 - Geschwindigkeit
- Umgebung
 - Straße (Spuren, Kreuzung,...)
 - Objekte (Position, Intention)
 - Witterung
- Bewertung

4 Software-Tool zur Sensorbewertung

4.1 Programmstruktur/Architektur

4.2 Implementierung

5 Evaluation

6 Zusammenfassung und Ausblick

Literatur

- [ARB13] APATEAN, Anca ; ROGOZAN, Alexandrina ; BENSRAHAIR, Abdelaziz: 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
- [ATK10] AHTIAINEN, Juhana ; TERHO, Sami ; KOPONEN, Sampsa: 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
- [BBD⁺13] BROGGI, Alberto ; BUZZONI, Michele ; DEBATTISTI, Stefano ; GRISLERI, Paolo ; LAGHI, Maria C. ; MEDICI, Paolo ; VERSARI, Pietro: 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
- [BDH⁺18] BENGLER, Klaus ; DRÜKE, Julia ; HOFFMANN, Silja ; MANSTETTEN, Dietrich ; NEUKUM, Alexandra: *UR:BAN Human Factors in Traffic*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-15418-9>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-15418-9>. – ISBN 978–3–658–15417–2
- [BFR12] 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
- [DDSV16] DATONDI, SOKEMI RENE EMMANUEL ; DUPUIS, Yohan ; SUBIRATS, Peggy ; VASSEUR, Pascal: 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/ITS.2016.2590444>. – DOI 10.1109/ITS.2016.2590444. – ISSN 1548-3918

- 1109/TITS.2016.2530146. – DOI 10.1109/TITS.2016.2530146. – ISSN 1524–9050
- [Dr 18] DR ROLAND KRZIKALLA: *Vehicle Self-Localization using Laserscanners*. 2013-09-18
- [Eli18] ELIAS STRIGEL: *Laser- and Video based Detection of Road Users at Intersections*. 2013-09-18
- [ERM] ERNST, Susanne ; RIEKEN, Jens ; MAURER, Markus: 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
- [HGX12] HOSPEDALES, Timothy ; GONG, Shaogang ; XIANG, Tao: 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
- [HMS16] HERING, Ekbert ; MARTIN, Rolf ; STOHRER, Martin: *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
- [J. 09] J. EHRLICH ET AL.: *SP2 - INFRASENS - SP Infrastructure Platform*. 2009
- [JBS] JODOIN, Jean-Philippe ; BILODEAU, Guillaume-Alexandre ; SAUNIER, Nicolas: Urban Tracker: Multiple object tracking in urban mixed traffic. In: *2014 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)*, S. 885–892
- [Kee] KEEGAN GARCIA, MINGJIAN YAN, ALEK PURKOVIC: Robust traffic and intersection monitoring using millimeter wave sensors. 2018

- [Kla05] KLAUS DIETMAYER, ALEXANDER KIRCHNER UND NICO KÄMPCHEN: Fusionsarchitekturen zur Umfeldwahrnehmung für zukünftige Fahrerassistenzsysteme. In: MAURER, Markus (Hrsg.) ; STILLER, Christoph (Hrsg.): *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*. Berlin/Heidelberg : Springer-Verlag, 2005. – ISBN 3–540–23296–6, S. 59–88
- [KLGFK16] KNAKE-LANGHORST, Sascha ; GIMM, Kay ; FRANKIEWICZ, Tobias ; KÖSTER, Frank: 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
- [Kon] KONSTANTINOS KANISTRAS, GONCALO MARTINS, MATTHEW J. RUTHERFORD, KIMON P. VALAVANIS: A Survey of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for Traffic Monitoring. 2013
- [Leo08] LEONHARD F. WALCHSHÄUSL: *Maschinelle Erkennung von Verkehrsteilnehmern mittels heterogener Sensorik*. München, Technische Universität München, Diss., 2008
- [LSSH] LUNDGREN, Malin ; STENBORG, Erik ; SVENSSON, Lennart ; HAMMARSTRAND, Lars: Vehicle self-localization using off-the-shelf sensors and a detailed map. In: *2014 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, S. 522–528
- [Mic] 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
- [Mic18] MICHAEL GOLDHAMMER, ULRICH BRUNSMANN, KONRAD DOLL: *Sensor Technology at the Smart Public Intersection Aschaffenburg*. 2013-09-18

- [MRD] MEISSNER, Daniel ; REUTER, Stephan ; DIETMAYER, Klaus: Real-time detection and tracking of pedestrians at intersections using a network of laserscanners. In: *2012 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, S. 630–635
- [NHF15] NEGIED, Nermin K. ; HEMAYED, Elsayed E. ; FAYEK, Magda 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
- [PIA10] 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
- [RBS⁺] RESCHKA, Andreas ; BOHMER, Jurgen R. ; SAUST, Falko ; LICHTER, Bernd ; MAURER, Markus: Safe, dynamic and comfortable longitudinal control for an autonomous vehicle. In: *2012 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, S. 346–351
- [Rud09] RUDI LINDL: *Tracking von Verkehrsteilnehmern im Kontext von Multi-sensorsystemen*. München, TU München, Diss., 2009
- [Sch] SCHINDLER, Andreas: Vehicle self-localization with high-precision digital maps. In: *2013 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, S. 141–146
- [SM17] SHIRAZI, Mohammad S. ; MORRIS, Brendan T.: Looking at Intersections: A Survey of Intersection Monitoring, Behavior and Safety Analysis of Recent Studies. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 18 (2017), Nr. 1, S. 4–24. <http://dx.doi.org/10.1109/TITS.2016.2568920>. – DOI 10.1109/TITS.2016.2568920. – ISSN 1524–9050
- [SMS⁺] STRIGEL, Elias ; MEISSNER, Daniel ; SEELIGER, Florian ; WILKING, Benjamin ; DIETMAYER, Klaus: The Ko-PER intersection laserscanner

- and video dataset. In: *2014 IEEE 17th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, S. 1900–1901
- [Tom] TOM M. GASSER ET. AL.: *Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung*
- [TR14] TRÄNKLER, Hans-Rolf ; REINDL, Leonhard 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
- [VVM17] VIVACQUA, Rafael ; VASSALLO, Raquel ; MARTINS, Felipe: 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
- [WHLS15] WINNER, Hermann ; HAKULI, Stephan ; LOTZ, Felix ; SINGER, Christina: *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
- [WL15] WANG, Guohua ; LIU, Qiong: 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
- [YSA⁺13] 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

Hier sind zusätzliche Infos einzubringen

Das Beispiel für eine Tabbing Umgebung zeigt, dass es möglich ist, mehrere Zeilen mit dem gleichen Einzug darzustellen:

$$v_{Start} = 120 \text{ km/h} = 33,3 \text{ m/s}$$

$$v_{End} = 80 \text{ km/h} = 22,2 \text{ m/s}$$

$$v_{Diff} = 40 \text{ km/h} = 11,1 \text{ m/s}$$