



Simulation von infrastrukturellen Umfelderfassungslösungen zur Systemkonzeptbewertung

Masterarbeit

erstellt von cand. mach. Viviane Bremer
Braunschweig, der 4. 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	VIII
Tabellenverzeichnis	IX
Abkürzungsverzeichnis	X
Symbolverzeichnis	XI
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	7
2.2 Datenverarbeitung	8
2.2.1 Objekterkennung und Tracking	8
2.2.2 Sensordatenfusion	9
2.3 Sensoreinsatz im Fahrzeug	12
2.4 Sensoreinsatz in der Infrastruktur	13
3 Anforderungen an ein Software-Tool zur Sensorbewertung	18
4 Software-Tool zur Sensorbewertung	19
4.1 Programmstruktur/Architektur	19
4.2 Implementierung	19
5 Evaluation	20
6 Zusammenfassung und Ausblick	21
Literatur	22
Anhang	27

Abbildungsverzeichnis

1	Veranschaulichung des Trilaterationsprinzips für ein rundes Objekt . . .	3
2	Schematischer Ablauf der Datenverarbeitung [WHL15]	8
3	Ansätze der Datenaufnahme für die Datenfusion	10
4	Implizite Sensordatenfusion mit asynchronen Sensoren [Kla05]	11
5	Explizite Sensordatenfusion mit synchronen Sensoren [Kla05]	11
6	Beispielhafte Darstellung der Umfelderkennungssensoren am Fahrzeug	12

Tabellenverzeichnis

1	Fahrzeugautomatisierungsgrade nach der Bundesanstalt für Straßen- wesen	15
2	Einsatz von Sensoren im Fahrzeug	16
3	Einsatz von Sensoren in der Infrastruktur	17

Abkürzungsverzeichnis

Symbolverzeichnis

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

1 **Einleitung**

2 Umfelderkennung

Dieses Kapitel stellt zunächst die bestehenden 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 wird in den Abschnitten 2.3 und 2.4 aufgezeigt, wie dies im Fahrzeug und auch in der Infrastruktur genutzt wird.

2.1 Sensoren zur Umfelderkennung

Die Sensoren zur Umfelderkennung werden in entfernungsgebende und bildgebende Sensoren unterschieden. Zu ersterem gehören der Ultraschall, der Radar und der 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 gehören zu den Frequenzen, die für das menschliche Ohr nicht hörbar sind. Die Messung mit Ultraschall gehört zu den Laufzeitmessungen. Ein Sender emittiert Schallwellen, die schließlich von Objekten reflektiert werden. Mit Hilfe der gemessenen Laufzeit Δt , bis das Echo wieder am Sender ankommt, kann der Abstand d zum gemessenen Objekt mit Hilfe der Schallgeschwindigkeit c_S bestimmt werden [TR14]:

$$d = \frac{c_S \Delta t}{2}. \quad (1)$$

Da die Strecke zwischen Sender und Objekt zweimal durchlaufen wird, muss diese halbiert werden um den tatsächlichen Abstand zu erhalten. Neben der reinen Abstandsmessung kann mit Hilfe von zwei Sendern, deren Erfassungsbereiche überlappen, auch eine Positionsbestimmung durchgeführt werden. Hierzu wird das Trilaterationsverfahren genutzt. Für ein rundes Objekt ist dies in Abbildung 1 dargestellt. Der

Abbildung
überarbeiten!

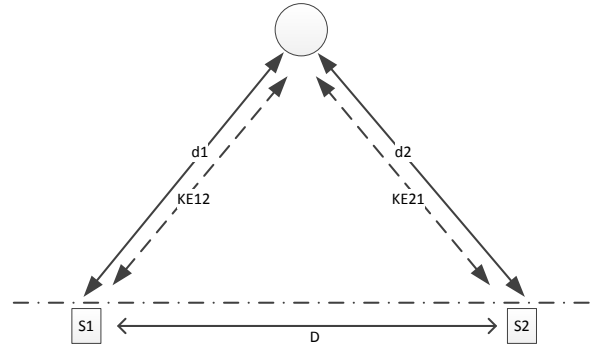


Abbildung 1: Veranschaulichung des Trilaterationsprinzips für ein rundes Objekt

Abstand D berechnet sich mittels des Satzes von Pythagoras:

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

Die Reichweite des Ultraschallsensors ist abhängig von der ausgesendeten Schallintensität I_s , die in Abhängigkeit von der Entfernung r des gemessenen Objektes abnimmt. Somit ergibt sich mit der effektiven Reflexionsfläche σ und bezogen auf den Normabstand r_1 die reflektierte Schallintensität

$$I_{refl} = \sigma I_s \left(\frac{r_1}{2r} \right)^2. \quad (3)$$

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 Rauschens liegen, d.h. $\geq 10\text{dB}$ sein.

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 Zeit bis der reflektierte Schall die Membran wieder zur Schwingung anregt wird mit Gleichung 1 zur Abstandsbestimmung genutzt.

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].

Zur Abstandsmessung finden zwei verschiedene Ansätze Verwendung, die sich in der Frequenzmodulation unterscheiden. Das ist einmal das Dauerstrichradar (FMCW – Frequency Modulated Continuous Wave) und zum anderen die Chirp Frequency Modulation. Die Frequenzverläufe der beiden Modulationsverfahren sind in Abbildung dargestellt. Das Dauerstrichradar erzeugt durch die kontinuierliche und rampenförmige Veränderung der Momentanfrequenz eine konstante Phasenverschiebung von $+(2r/c)^2 m_\omega$. Der Abstand und die Geschwindigkeit wird bei diesem Verfahren mithilfe der Frequenzverschiebung bestimmt:

Abbildung
einfügen!

$$r = \frac{c}{2} \cdot \frac{\omega_{obj,1} - \omega_{obj,2}}{m_{\omega,1} - m_{\omega,2}}, \quad (4)$$

$$\dot{r} = \frac{c}{2\omega_0} \cdot \frac{m_{\omega,1}\omega_{obj,1} - m_{\omega,2}\omega_{obj,2}}{m_{\omega,1} - m_{\omega,2}}. \quad (5)$$

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

$$r = \frac{1}{2} c t_{of} \quad (6)$$

Für die Bestimmung der Geschwindigkeit wird beim Radar der Doppler-Effekt genutzt. 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 und ergibt sich mit der Trägerfrequenz f_0 und der Lichtgeschwindigkeit c folgendermaßen:

$$f_{Doppler} = -\frac{2\dot{r}}{c} f_0 \quad (7)$$

Bei einer Annäherung ($\dot{r} < 0$) 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

$$P_R = \frac{10^{-2kr/1000} \sigma \lambda^2 G^2 V_{mp}^2 P_{total}}{(4\pi)^3 r^4} \quad (8)$$

mit dem Rückstreuquerschnitt des Objektes

$$\sigma_{plate} = 4\pi \frac{A^2}{\lambda^2}. \quad (9)$$

Gleichung 8 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 ist zum Einen das mechanische Scanning, bei dem eine Strahlableitvorrichtung oder eine Planarantenne mechanisch geschwenkt wird. Dabei bewegt sich die Radarkeule mit einer Schrittweite von etwa 1° , siehe Abbildung . Das zweite Verfahren ist das Monopuls-Verfahren. Hierbei erzeugt eine separate Antenne einen Sendestrahl, der von einer Doppelantennen-Anordnung empfangen wird, siehe Abbildung . Eine Verbesserung dieses Verfahrens ermöglicht die Verwendung von Mehrstrahlern mit bis zu vier Antennen.

Abbildung
einfügen
Abbildung
einfügen

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 ähnlich wie beim Ultraschall bestimmt:

$$d = \frac{c_L \Delta t}{2} \quad (10)$$

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 für ein großes bzw. nahes Objekt die folgende Gleichung:

$$P_r = \frac{\rho_L \cdot A_t \cdot H \cdot T^2 \cdot P_t}{\pi^2 \cdot R^3 \cdot (Q_v/4)(\Phi/2)^2} \quad (11)$$

Für ein Objekt, das – aufgrund der Entfernung – kleiner ist als der Lichtpunkt, ändert sich Gleichung 11 zu:

$$P_r = \frac{\rho_L \cdot A_t \cdot H \cdot T^2 \cdot P_t}{\pi^2 \cdot R^4 \cdot (Q_v Q_h/4)(\Phi/2)^2}. \quad (12)$$

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° und 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. Somit können Objekte mit einer hohen Genauigkeit identifiziert werden. Jedoch ist die Entfernungsmessung mit einer Monokamera eher ungenau, da dies nur anhand der Auflösung geschätzt werden kann. Diese bestimmt auch den Sichtbereich und die Reichweite. 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

$$a_v = \frac{af'^2}{f'^2 - u'k(a + f')} \quad (13)$$

$$a_h = \frac{af'^2}{f'^2 + u'k(a + f')}. \quad (14)$$

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:

$$u' = \frac{\text{Formatdiagonale}}{1000} \quad (15)$$

Neben dem sichtbaren Spektrum können einige Kameras auch das Infrarotspektrum erkennen. So kann auch bei Nacht bzw. Dunkelheit die Kamera weiterhin eingesetzt werden. Es gibt zwei verschiedene Ansätze hierbei, die unterschiedliche Infrarotbereiche nutzen [WHL15]. Eine Möglichkeit ist das Nahinfrarot (NIR). Hierbei wird die Szene mit NIR-Strahlung ausgeleuchtet, die 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.

2.2 Datenverarbeitung

Im folgenden Abschnitt wird auf die Datenverarbeitung genauer eingegangen. Hierzu gehört die Objekterkennung und das Objekttracking, welche durch eine Datenfusion erweitert werden können. Der Ablauf der Datenverarbeitung ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt.

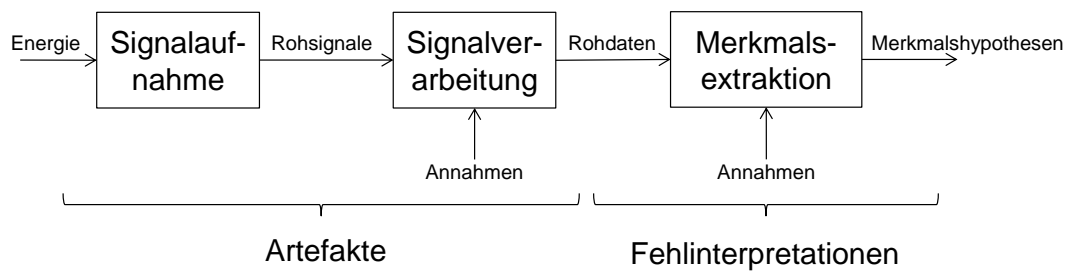


Abbildung 2: Schematischer Ablauf der Datenverarbeitung [WHL15]

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 und Tracking

Für die Objekterkennung und das Tracking gibt es unterschiedliche Verfahren. Bei der Objekterkennung ist die Wahl des Verfahrens insbesondere abhängig vom Sensortyp.

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

Beispielbilder
für Seg-
mentie-
rungsver-
fahren
und
Gradi-
entenver-
fahren?

liegen. So werden diese Punkte mittels Region-Growing oder Linienextraktion gruppiert bzw. verbunden. Nach diesem Schritt werden die Segmente in I- und L-Formen unterschieden. Unter Verwendung der Segmentabmessungen kann schließlich die Objektklasse bestimmt werden [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. 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.

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

Gleichungen?

Der Kalman-Filter schätzt die Zustände aufgrund von redundanten Daten. Die mögliche neue Position wird mit Systemeingangsdaten geschätzt und mit Messwerten verglichen. Die Differenz aus Schätzung und Messung wird schließlich gewichtet und dient als Korrektur des aktuellen Zustands.

Beim Partikelfilter wird die Wahrscheinlichkeitsdicht durch die endliche Summe von Diracstößen mit Gewichten approximiert. Die Paare aus Gewicht und Zustand werden als Partikel betrachtet. Nach jedem Innovationsschritt werden schließlich die Gewichte aktualisiert.

2.2.2 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 bedeutet ist

in Abbildung 3 dargestellt. Werden Sensoren komplementär genutzt, 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].

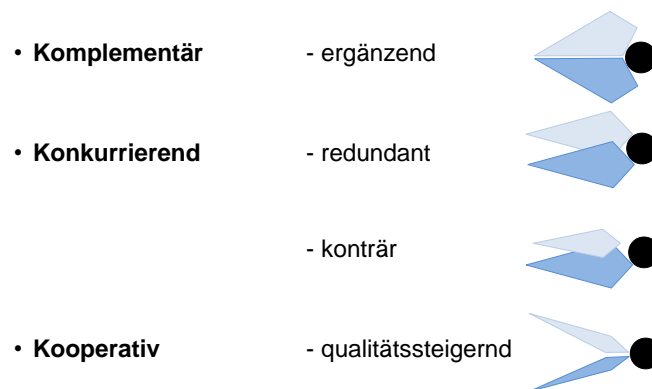


Abbildung 3: Ansätze der Datenaufnahme für die Datenfusion

Für die Sensordatenfusion gibt es zwei wesentliche Ansätze, siehe Abbildungen 4 und 5. 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.

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

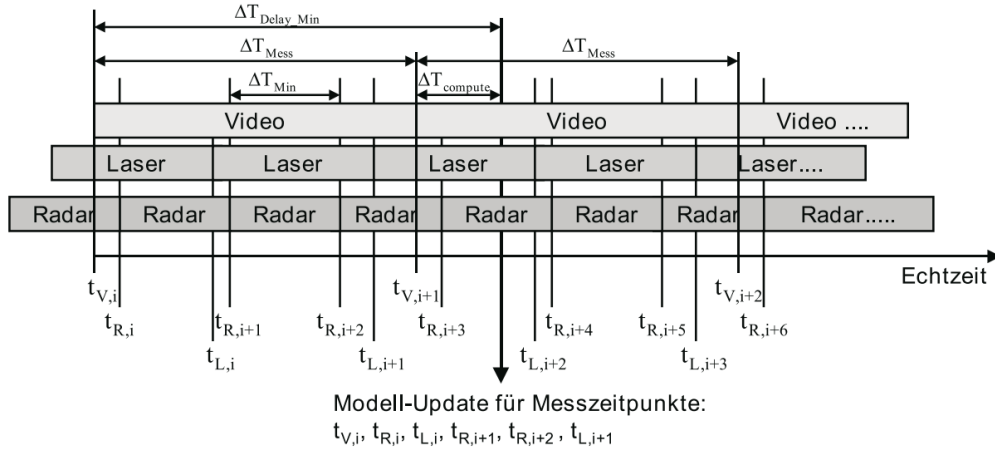


Abbildung 4: Implizite Sensordatenfusion mit asynchronen Sensoren [Kla05]

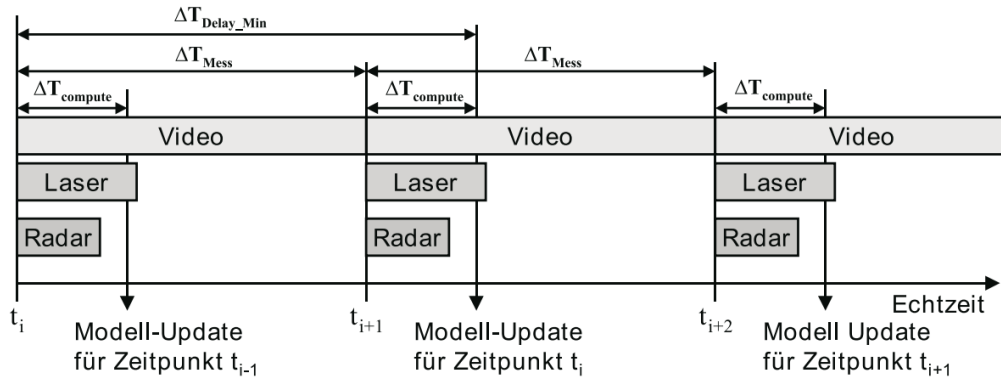


Abbildung 5: Explizite Sensordatenfusion mit synchronen Sensoren [Kla05]

deterministisch und es kommt zu einem hohen Verzug zwischen Realwelt und Modell. Die Arbeit mit synchronisierten Sensoren bietet jedoch, neben der sicheren Assoziation, eine einfache Erweiterbarkeit um weitere Sensoren.

Werden asynchrone Sensoren bei der Datenfusion verwendet, müssen die Daten sequentiell eingebracht werden. Somit ist der Algorithmus nicht deterministisch. Durch dieses Vorgehen kann es jedoch zu Quantisierungsfehlern kommen. Insbesondere, wenn die Daten des Sensors mit der kürzesten Latenz kurz nach denen vom Sensor mit der längsten 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.

2.3 Sensoreinsatz im Fahrzeug

Im Fahrzeug werden die Sensoren zur Umfelderfassung so verbaut, dass ein möglichst großes Sichtfeld erzeugt wird. Eine Möglichkeit ist schematisch in Abbildung 6 dargestellt. Zu erkennen ist, dass das Long Range Radar und das Lidar in Fahrtrichtung genutzt wird. So kann eine vorausschauende Fahrweise realisiert werden. Short Range Radar, Kamera und Ultraschall dienen eher der Beobachtung des unmittelbaren Umfeldes.

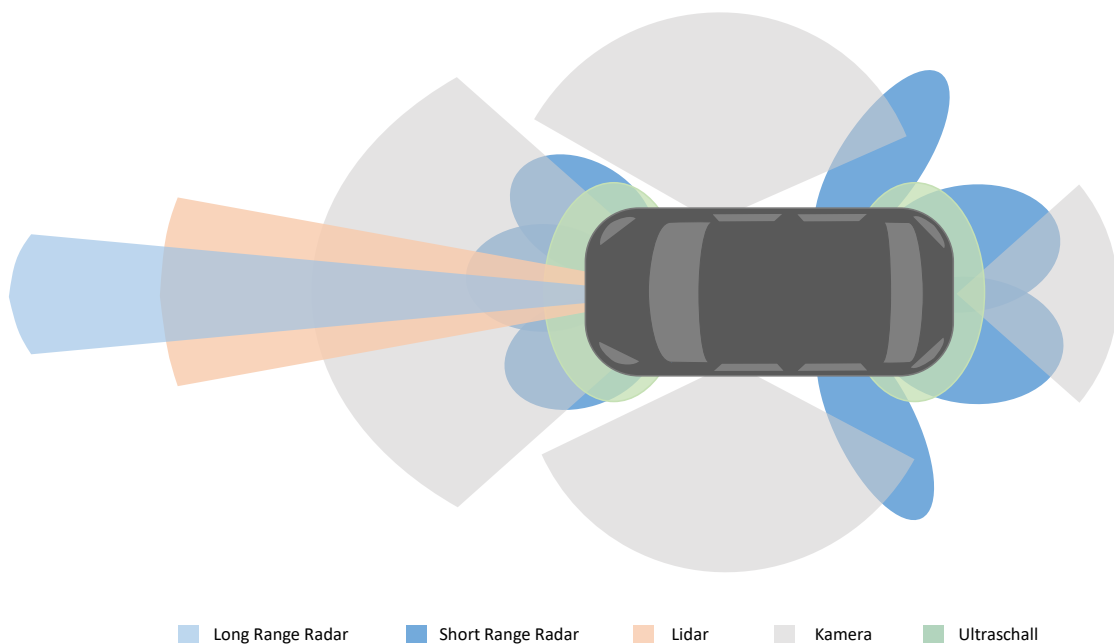


Abbildung 6: Beispielhafte Darstellung der Umfelderfassungssensoren am Fahrzeug

Der Einsatz dieser Sensoren wird für die schrittweise Automatisierung des Fahrzeugs genutzt. Nach der Bundesanstalt für Straßenwesen wird in fünf Automatisierungsgrade unterschieden. Diese sind in Tabelle 1 aufgeführt und erläutert. Serienfahrzeuge bewegen sich mittlerweile im Automatisierungsgrad "Teilautomatisiert".

Quelle
einfügen

Die Automatisierung des Fahrzeugs wird mit Hilfe der sogenannten Fahrerassistenzsystemen durchgeführt [WHLS15]. Sie dienen vor allem der Sicherheit und erhöhen außerdem den Fahrkomfort. So kann beim Adaptive Cruise Control (ACC), das ein Long Range Radar oder ein Lidar nutzt, eine Wunschgeschwindigkeit eingestellt werden. Diese wird bei Annäherung an andere Fahrzeuge reduziert, um Auffahrunfälle

zu vermeiden. Eine Erweiterung hierzu stellt der Stauassistent ACC Stop & Go dar. Dieser nutzt insbesondere das Short Range Radar. Für Einparkassistenten werden Ultraschallsensoren oder Kameras genutzt. Hierbei werden entweder nur Tonsignale emittiert, eine grafische Darstellung im Boardcomputer gezeigt oder das Fahrzeug führt das Einparken vollautomatisch durch. Des Weiteren finden Spurhalte- und Spurwechselassistenten und Toter Winkel Assistenten Gebrauch, um Unfälle mit seitlich von Hinten herannahenden oder kreuzenden Verkehrsteilnehmern zu minimieren. Diese Assistenten nutzen Radar, Lidar oder Kamera und auch Kombinationen aus zwei dieser Sensoren.

In den vergangenen zehn Jahren wurde an verschiedenen Aspekten der Fahrzeugautomatisierung gearbeitet. Eine Auswahl an Arbeiten ist in Tabelle 2 aufgeführt. Ein wichtiger Aspekt ist die Objekterkennung, bei der insbesondere die Erkennung von Menschen in den Vordergrund gerückt ist. Dies stellt mittels Radar aufgrund ihres geringen Reflexionsquerschnitts und der schlechten Winkelauflösung des Radars eine Herausforderung dar. Mögliche Ansätze wurden bei [ATK10] und [BFR12] erarbeitet. Auch die Objekterkennung mit Hilfe von Infrarotkameras findet immer mehr Einsatz [NHF15], [WL15], da hiermit auch nachts die Kamera genutzt werden kann. Für die Verbesserung der Datenqualität wird auch an der Sensordatenfusion gearbeitet [Rud09], [ARB13].

Für das hochautomatisierte Fahrzeug gibt es verschiedene Ansätze. Hierbei spielt die Selbstlokalisierung eine wichtige Rolle, da das Fahrzeug jederzeit wissen muss, wo es sich befindet. Um dies zu realisieren werden neben den Umfelderfassungssensoren auch GPS, Beschleunigungs- und Geschwindigkeitssensoren und digitale Karten genutzt. So kann eine möglichst genaue Schätzung der Position durchgeführt werden. Einige Ansätze sind in [Dr 18], [Sch], [LSSH] und [VVM17] zu finden.

2.4 Sensoreinsatz in der Infrastruktur

zur Unfallforschung

Verständnis von Fahrzeug-Fahrrad-Interaktion

unterstützend zum autonomen Fahren

C2X Kommunikation

Der Einsatz von Umfelderfassungssensoren in der Infrastruktur dient der Verkehrsbeobachtung. Insbesondere werden die aufgenommenen Daten zur Unfallforschung genutzt. So kann untersucht werden, welche Verhaltensmuster vermehrt zu Unfällen führen und weshalb es an gewissen Knotenpunkten häufig zu Unfällen kommt. Hierbei ist insbesondere die Interaktion zwischen KFZ bzw. LKW und Fahrrad interessant [Dot]. Außerdem wird der Einfluss der Witterung und der Tageszeit auf das Unfallgeschehen untersucht [J. 09].

Quelle?

Der Tabelle 3 ist zu entnehmen, dass die Kamera bei der Verkehrsbeobachtung am häufigsten verwendet wird. Dies ist in der Tatsache begründet, dass sie eine ähnliche Darstellung wie das menschliche Auge erzeugt, siehe Abschnitt 2.1.4. Für die Bestimmung der Positionen wird sie meist mit Lidar oder Radar kombiniert.

Nomenklatur	Fahraufgabe nach Automatisierungsgrad
Driver Only	Fahrer führt dauerhaft Längs- und Querverführung aus
Assistiert	<p>Fahrer führt dauerhaft entweder die Quer- oder die Längsverführung aus. Die jeweils andere Fahraufgabe wird in gewissen Grenzen vom System ausgeführt</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fahrer muss System überwachen • Fahrer muss jederzeit für die vollständige Übernahme bereit sein
Teilautomatisiert	<p>Das System übernimmt Quer- und Längsverführung (für einen gewissen Zeitraum oder/und in spezifischen Situationen)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fahrer muss System überwachen • Fahrer muss jederzeit für die vollständige Übernahme bereit sein
Hochautomatisiert	<p>Das System übernimmt Quer- und Längsverführung für einen gewissen Zeitraum in spezifischen Situationen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fahrer muss System nicht überwachen • Fahrer wird rechtzeitig zur Übernahme aufgefordert • Systemgrenzen werden alle erkannt
Vollautomatisiert	<p>Das System übernimmt Quer- und Längsverführung vollständig in einem definierten Anwendungsfall</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fahrer muss System nicht überwachen • Fahrer wird rechtzeitig vor verlassen des Anwendungsfalles zur Übernahme aufgefordert • Erfolgt keine Übernahme, wird das System in einen risikoarmen Zustand geführt • Systemgrenzen werden alle erkannt

Tabelle 1: Fahrzeugautomatisierungsgrade nach der Bundesanstalt für Straßenwesen

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
[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
[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
[VVM17]	GPS Gyroscope Kamera	KFZ ausgestattet mit GPS, Gyroscope, Kamera und Laptop zur Selbstlokalisierung	2017

Tabelle 2: 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
[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
[Dot]	Kamera IR Radar	Untersuchung von Konflikten zwischen Fahrradfahrern und motorisierten Fahrzeugen	2017
[Kee]	Radar	Stellt 76-81GHz Radar zur Verkehrsüberwachung vor	2018

Tabelle 3: 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
- [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/TITS.2016.2530146>. – DOI 10.1109/TITS.2016.2530146. – ISSN 1524–9050
- [Dot] DOTZAUER M., KNAKE-LANGHORST S., KÖSTER F.: Understanding Interactions Between Bicyclists and Motorists in Intersections. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-15418-9_17. In: *URBAN Human Factors in Traffic*. – DOI 10.1007/978-3-658-15418-9_17
- [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

- [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

- [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

- [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
- [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:

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

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

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