

1. Einleitung

1.1. Motivation

Individuelle Mobilität ist das Grundbedürfnis einer modernen Gesellschaft. Ein effizientes und sicheres Verkehrssystem ist deshalb die Grundlage einer modernen Volkswirtschaft und genießt höchste wirtschaftliche Bedeutung [5]. Aufgrund der immensen gesellschaftlichen Kosten von über 160 Milliarden €, bedingt durch 1 500 000 Verkehrsunfälle, 54 000 Verkehrstote und 2 000 000 Verletzte wurde im Jahr 2001 das ambitionierte Ziel ausgegeben, die Zahl der Verkehrstoten bis 2010 zu halbieren. Diese Ziel wurde im Weißbuch zur europäischen Verkehrspolitik [4] formuliert. Im Rahmen dieser Anstrengungen wurden Maßnahmen zur Fahrerqualifikation, Verbesserung der Straßeninfrastruktur und der Fahrzeugtechnologie auf den Weg gebracht. In Abbildung 1.1 ist die Entwicklung der verunglückten Personen, mit Verletzungen und der Verkehrstoten in Deutschland von 1953 bis 2011, dargestellt. Wie ersehen werden kann hat sich

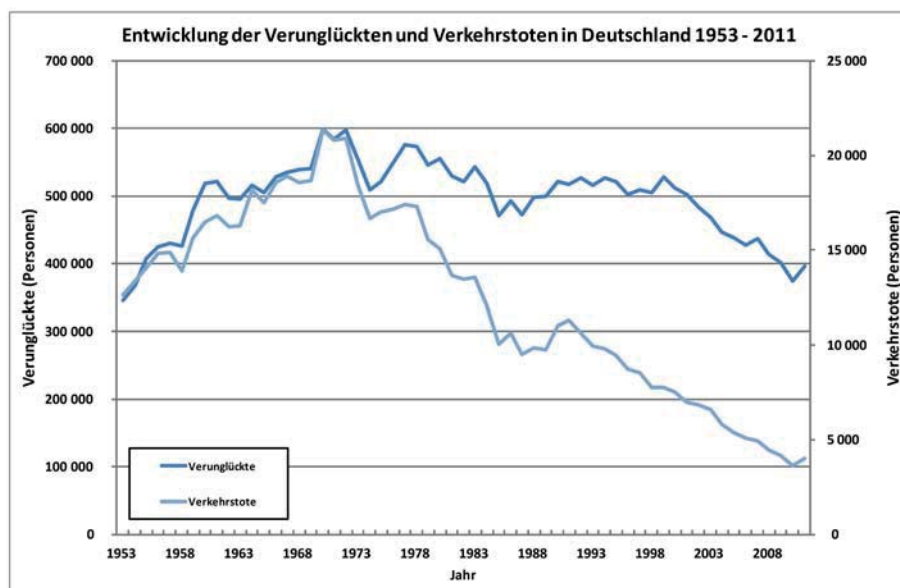


Abbildung 1.1.: Entwicklung der Verunglückten und Verkehrstoten in Deutschland von 1953 bis 2011 basierend auf den Daten von [11]

seit dem Jahr 2000 die Anzahl der Verunglückten von 511 577 auf 395 934 im Jahr 2011 Personen reduziert. Dies entspricht einem Rückgang von 22,6%. Im gleichen Zeitraum hat sich die Anzahl der getöteten Personen, welche eine Teilmenge der Verunglückten darstellen, von 7 503 Personen auf 4 002 Personen reduziert, was einem Rückgang von 46,6% entspricht. Nach Aussage des statistischen Bundesamts trat im

Jahr 2011 eine Stagnation aufgrund der schlechten Witterung zum Jahresbeginn ein. Bei einer Auswertung des Fehlverhaltens von Fahrzeugführern im Zusammenhang von Unfällen mit Personenschäden [5] folgt, dass von 520 702 der beteiligten Fahrzeugführern 350 323 ein Fehlverhalten zugeschrieben werden kann. Die häufigsten Ursachen sind: nicht angepasste Geschwindigkeit, Missachtung der Vorfahrt und Unterschreitungen des Abstands. In [10] wird angeführt, dass fast 95% der Unfälle zumindest zum Teil, auf den Faktor Mensch zurückzuführen sind. Drei Viertel der Unfälle sind ausschließlich auf menschliches Fehlverhalten zurückzuführen. In diesem Zusammenhang hat eine im Jahr 2002 eingesetzte Experten-Gruppe, mit Vertretern der Automobilindustrie und der Legislative, das größte Potential zur Lösung der Sicherheitsprobleme im Straßenverkehr durch den Einsatz von intelligenten Fahrzeugsicherheitssystemen identifiziert [6]. Seit 1970 hatte sich gezeigt, dass durch Einsatz von passiven Sicherheitssystemen, wie z.B. Sicherheitsgurte, Airbags und Fahrgastzellen, die Zahl der Verletzten um 20 % und die Zahl der getöteten Unfallbeteiligten um 50 % reduziert werden konnte. Obwohl die Verkehrsumfälle während dieser Zeit um ca. 40 % anstiegen. Jedoch ist das Potential der passiven Systeme weitestgehend ausgeschöpft, so dass es immer schwieriger wird weitere Verbesserungen der Sicherheit mit akzeptablen Aufwand zu erreichen [6].

Daraus entstand der Bedarf nach aktiven Sicherheitssystemen, welche den Fahrer unterstützen. Diese Fahrerassistenzsysteme (FAS) informieren und warnen den Fahrer, erhöhen den Komfort und reduzieren die Arbeitsbelastung durch eine aktive Stabilisierung und das Manövrieren des Fahrzeugs [8]. Die Systeme übernehmen nicht die Fahraufgabe im Ganzen, daher bleibt die Verantwortung zur Steuerung des Fahrzeugs immer beim Fahrer. Die bekanntesten Beispiele für diese Systeme sind das Anti-Blockier-System (ABS) und die elektronische Stabilitätskontrolle (ESC/ESP) [23], zur Reduktion von Schleuder- oder Überschlagsunfällen.

Zur Vermeidung von Kollisionen nach einem Fahrspurwechsel oder dem unbeabsichtigten Verlassen der Fahrspur/Fahrbahn sind diese Fahrzeugstabilisierungssysteme nicht ausreichend. Aus diesem Grund wurden Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung oder auch Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) [8] entwickelt. Im Gegensatz zu konventionellen Fahrerassistenzsysteme, zeichnen sich diese durch die Wahrnehmung und Bewertung des Umfelds außerhalb des Fahrzeugs, mit entsprechenden Sensoren, wie z.B. Kameras, Radar, Ultraschall und die Verwendung externer Informationsquellen aus. Weiterhin wird eine komplexe Signalverarbeitung entsprechend der zu unterstützenden Fahraufgabe ausgeführt. Durch diese Fähigkeiten können angrenzende Fahrspuren und Objekte wahrgenommen werden. Damit ist eine Unterstützung des Fahrers bei einer drohenden Kollision mit einem anderen Fahrzeug oder bei einem Verlassen der Fahrbahn möglich. In Abbildung 1.2 sind die Sensoren eines aktuellen Audi A6 dargestellt. Die Systeme werden in Kapitel 2 näher beschrieben. Die erweiterte Funktionalität der Systeme spiegelt sich in einer höheren Komplexität in Entwurf und Entwicklung wieder. Zudem sind die Haftungsfragen bei einer Markteinführung intelligenter Fahrzeugsicherheitssysteme sehr komplex. Hierzu gehören neue Risiken für die Verbraucher, die Gesellschaft und vor allem für die Hersteller im Bereich der Produkthaftung, z.B. in Zusammenhang mit Rückrufaktionen. Die Risiken in Bezug auf die Produkthaftung sind nicht nur technologischer Natur, sondern erstrecken sich auch auf menschliche Faktoren wie Zuverlässigkeit, Beherrschbarkeit, Verständlichkeit, Berechenbarkeit und Widerstandsfähigkeit gegen Missbrauch. Deshalb muss die Zuverlässigkeit und funktionale Sicherheit von integrierter Elektronik und Software besonderes berücksichtigt werden. Ein guter Überblick über diese Problematik ist in [107] gegeben. Basierend auf den Erfahrungen mit der Norm DIN EN 61508 [73], wurde mit der ISO 26262 [12] eine

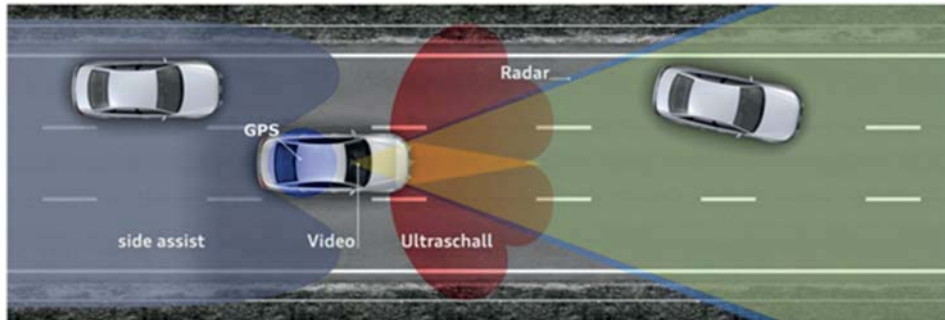


Abbildung 1.2.: Sensorik Audi A6 [19]

automobilspezifische Richtlinie geschaffen, welche einen definierten Entwicklungs- und Absicherungsprozess für Fahrzeugelektronikkomponenten vorschreibt. Mit den Erfahrungen aus den Response-Projekten [8] wurde ein Zusatz zur ISO 26262 geschaffen, welcher insbesondere auf Aspekte für ADAS eingeht. Eine Absicherung oder Erprobung der Fahrzeugelektronik findet auf Testfahrten und in der Simulation statt. Als Methoden für die simulationsbasierte Erprobung sind Modell-, Software-, Prozessor und Hardware-in-the-Loop seit langem etablierte Methoden. Durch die Einführung von ADAS werden gänzlich neue Anforderungen an diese Simulationsmethoden gestellt. Während es bei einem konventionellen System ausreicht die zur Überwachung des Fahrzeugzustands vorhandene Sensorik zu stimulieren oder zu simulieren, muss für die Erprobung von ADAS die Sensorik zur Umfeldwahrnehmung stimuliert oder simuliert werden. Die Varianz hinsichtlich der benötigten Qualität der Sensordaten reicht von Objekten bis zu Rohdaten eines Kamerasystems. Ein Objekt beschreibt z.B. die Position und Größe des Fahrzeugs, Rohdaten stellen die einzelnen Pixel eines Bilds dar. Weiterhin ist es notwendig das Verhalten des Fahrzeugumfelds durch eine Verkehrs- und Umfeldsimulation zu berechnen. Durch das Konzept der Datenfusion ist es außerdem nicht ausreichend nur einen Sensor zu stimulieren, es müssen alle Sensoren des Gesamtsystems stimuliert werden. Eine Kompensation dieser Lücke durch eine stärkere Durchführung der Tests mit realen Testfahrten ist ebenfalls keine Lösung. Durch die hohe Komplexität der ADAS und die Gefährlichkeit der notwendigen Testsituationen, z.B. die aktive Unfallvermeidung, ist eine Validierung der Funktion in der Realität nur mit großem technischen Aufwand möglich. Durch den großen Testraum, welcher aus einer Vielzahl von Parametern definiert wird, ist die Erprobung wirtschaftlich nicht darstellbar.

Deshalb ist es für die Automobilindustrie von höchster Wichtigkeit verlässliche simulationsbasierte Methoden für die Erprobung von Fahrerassistenz- und aktiven Sicherheitssystemen zu schaffen. Aus dieser Notwendigkeit sind in der jüngsten Vergangenheit verschiedene kommerzielle Simulationsmethoden entstanden. Diese unterscheiden sich hinsichtlich der Modellgenauigkeit deutlich. Durch Schmidt [170] wurden parallel zur dieser Arbeit Anstrengungen unternommen eine Toolkette für die Hardware-in-the-Loop Erprobung von kamerabasierten Fahrerassistenzsystemen zu schaffen.

In dieser Dissertation werden Methoden zur Erprobung von kameraunterstützten Fahrerassistenz- und aktiven Sicherheitssystem entwickelt. Es wird die Definition „kameraunterstützt“ eingeführt, da viele Systeme neben einer Kamera weitere Sensoren zur Wahrnehmung des Umfelds verwenden. Der Schwerpunkt der Anwendung der Methoden soll die Hardware-in-the-Loop Erprobung von vernetzten Fahrerassis-

tenzsystemen sein. Dieser Anwendungsfall sieht einen End-To-End Test der Funktionen vor, d.h. die Sensordaten sollen möglichst am Beginn der Signalverarbeitung eingespeist werden. Im Falle, dass ein Kamerasystem stimuliert werden soll, bietet sich die Erzeugung eines synthetischen Kamerabilds mit Mitteln der Computergrafik an. Da im Vergleich zu anderen Sensoren, wie z.B. Radar, der Aufwand geringer ist. Durch die Einschränkung, dass ein Modell immer eine Vereinfachung der Realität ist, ist es von Wichtigkeit zu untersuchen, welchen Realismusgrad die Simulation für eine plausible Stimulation der Bildverarbeitung aufweisen muss. Weiterhin müssen mögliche Anwendungsfelder für die Simulation in der Erprobung und Entwicklung definiert werden.

Zur Stärkung der methodischen Arbeit in der Computergrafik wurde ein Hardware-in-the-Loop Prüfstand mit der Virtual Test Drive-Toolkette zur Erprobung von Fahrerassistenz- und aktiven Sicherheitssystemen bei der AUDI AG entwickelt. Diese Systeme werden seit 2010 entwicklungsbegleitend eingesetzt. Mittels der Erfahrungen aus der Anwendung konnte die methodische Entwicklung gestärkt werden.

1.2. Zielsetzung

In der Motivation wurde dargelegt, dass die verstärkte Auslagerung von Testfahrten in die Simulation der einzige Weg zur wirtschaftlichen Entwicklung und Erprobung von komplexen Fahrerassistenz- und aktiven Sicherheitssystemen ist. Besonders die Stimulation von Kamerasystemen am Beginn der Wirkungskette, d.h. ab der Bildverarbeitung, ist für tiefgehendes Testkonzept von hoher Wichtigkeit. Daher gilt es vor allem zu klären, welche Genauigkeit simulierte Bilddaten aufweisen müssen, um einen End-To-End Test zu ermöglichen. Daher sollen im Rahmen dieser Arbeit die folgenden Leitfragen diskutiert werden:

- In welchem Maße kann eine Simulation für die Entwicklung und den Test verwendet werden?
- Welchen Grad an Komplexität muss die Simulation aufweisen?
- Welche Aufwände sind zur Erreichung dieser Zielsetzung notwendig?

Zur Lösung dieser Fragestellungen werden im Rahmen dieser Arbeit die folgenden Zielsetzungen im Vorfeld bearbeitet:

- Ziel 1: Analyse und Bewertung von Simulationslösungen für die Erprobung von Fahrerassistenzsystemen.
- Ziel 2: Definition von Anforderungen an eine Simulationsumgebung zur Stimulation von kameraunterstützten Fahrerassistenzsystemen.
- Ziel 3: Experimentelle Evaluierung der Komplexität der Simulation hinsichtlich:
 - Ziel 3.1: Simulation der Beleuchtung
 - Ziel 3.2: Geometrie und Oberflächeneigenschaften von Objekten
 - Ziel 3.3: Synthese von Kamerabildern

- Ziel 3.4: Aufbau von Szenen und Szenarien
- Ziel 4: Entwicklung eines generischen Verfahrens zur Validierung und Kalibrierung der Simulation.
- Ziel 5: Experimenteller Nachweis zur Anwendbarkeit von synthetischen Bilddaten.
- Ziel 6: Aufbau eines Systems für die Hardware-in-the-Loop Erprobung von Fahrerassistenzsystemen.
- Ziel 7: Definition von sinnvollen Anwendungsgebieten und von zukünftigen Verbesserungspotentialen.

1.3. Aufbau der Arbeit

Als Einleitung in die Thematik werden die betrachteten Fahrerassistenz- und aktiven Sicherheitssysteme in Kapitel 2 vorgestellt. Weiterhin werden die Sensoren zur Wahrnehmung des Fahrzeugumfelds beschrieben. Als besonders komplex erweist sich die Signalverarbeitung der Kamerasysteme, da die eigentlichen Messgrößen durch Bildverarbeitungsalgorithmen ermittelt werden. Daher gilt es für einen End-To-End Test die Bildverarbeitung zu stimulieren. Aus diesem Grund werden die zur Realisierung der betrachteten Fahrerassistenzsysteme- und aktiven Sicherheitsfunktionen verwendeten Bildverarbeitungsalgorithmen analysiert. Im Rahmen dieser Analyse werden die von den Algorithmen verwendeten Merkmale diskutiert. Außerdem werden Störgrößen welche zu einer Abschwächung oder Auslöschung dieser Merkmale führen beschrieben.

In Kapitel 3 werden die in der Automobilindustrie verwendeten Entwicklungsmethoden beschrieben. Dazu wird an erster Stelle der Entwicklungsprozess nach dem V-Modell erläutert. Darauf folgend werden die Vor- und Nachteile einer Erprobung im Fahrzeug, einer Wiedergabe von Messdaten und der simulationsbasierten Methoden Model-, Software- und Hardware-in-the-Loop betrachtet. Abschließend wird der Stand der Technik der simulationsbasierten Methoden vorgestellt und eine Bewertung der aktuellen Verfahren durchgeführt.

Auf Basis der vorher definierten Grundlagen werden im dritten Kapitel Anforderungen an eine Simulationsumgebung für den End-to-End Test von kameraunterstützten Systemen definiert. Zur Ableitung der Anforderungen werden die notwendigen Merkmale und Herausforderungen an die Bildverarbeitung zusammengefasst. Diese Anforderungen stellen die Grundlage zur Betrachtung notwendigen Komplexität einer Simulationsumgebung für die Stimulation der Signalverarbeitung dar. Zur Bearbeitung werden diese in die Schwerpunkte Beleuchtungssimulation, Geometrie und Oberflächeneigenschaften von Objekten, Synthese von Kamerabildern und Szenen- und Szenario-Design zusammengefasst.

In Kapitel 4 sind die Ergebnisse der Untersuchungen hinsichtlich der Komplexitätsanforderungen der vorher definierten Schwerpunkte zusammengefasst. Als erstes wird die für die Evaluierung verwendete Simulationsumgebung beschrieben. Anschließend werden Verfahren zur Simulation einer realitätsnahen Beleuchtung betrachtet. Weiterhin werden die Aufwände zur Simulation der Straße, Fahrzeuge und Verkehrsschildern untersucht. In der Computergrafik werden Bilder mittels geometrischer Abbildungen synthetisiert, dieser Prozess unterscheidet sich von der Bildaufnahme mit einer realen Kamera. Daher gilt es den Prozess zur Erzeugung eines möglichst realitätsnahen Bilds zu untersuchen. Abschließend werden

die Anforderungen an den Aufbau von Szenen und Szenarien für die Durchführung von Tests in der Simulation untersucht.

Eine genaue Parametrierung der Modelle ist für die Durchführung von simulationsbasierten Erprobungen von hoher Wichtigkeit. Die Durchführung einer Kalibrierung und Validierung der Modelle ohne eine Rückmeldung für den Anwender gestaltet sich schwierig. In Kapitel 5 wird auf Basis der in dieser Arbeit erlangten Erkenntnisse eine generische Metrik zur Messung der Abweichung zwischen der Simulation und der realen Referenz definiert. Zur Demonstration der Fähigkeit zur Verwendung der Metrik für eine automatische Optimierung von Modellparametern wurde die Metrik in die Simulationsumgebung integriert und eine beispielhafte Optimierung von Parametern durchgeführt.

Zur weiteren Bewertung der Anwendbarkeit einer Kamerasimulation werden in Kapitel 6 die Ergebnisse von experimentellen Untersuchungen vorgestellt. Im ersten Teil werden die bei der Entwicklung eines Fahrzeugererkennungssystems mit simulierten Bilddaten gesammelten Erkenntnisse präsentiert. Darauf folgend wird das Verhalten der Signalverarbeitungskette mit simulierten Bilddaten untersucht.

In Kapitel 7 wird der entwickelte Hardware-in-the-Loop Prüfstand für die Durchführung von End-to-End Tests präsentiert. Dazu wird an erster Stelle das technische Konzept beschrieben. Danach wird die Stimulation der Kamera mittels einer optischen Übertragung untersucht und die Anwendungsmöglichkeiten bewertet. Abschließend werden die mit dem System durchgeführten Tests beschrieben und der Trend der Erprobung dargestellt.

Zum Abschluss dieser Arbeit werden die zu Beginn formulierten Leitfragen mit den in den vorherigen Kapiteln gesammelten Erkenntnissen diskutiert. Abschließend wird ein Ausblick auf Potentiale und zukünftige Entwicklungsrichtungen gegeben.

2. Fahrerassistenz- und aktive Sicherheitssysteme

2.1. Aktuelle Fahrerassistenzsysteme und aktive Sicherheitssysteme

Moderne Straßenfahrzeuge, wie ein Audi A8, sind mit Fahrerassistenz- und aktiven Sicherheitssystemen ausgestattet. Diese Systeme unterstützen den Fahrzeugführer bei der Navigation/Information, Manövrierung und Stabilisation des Fahrzeugs [196]. Die Verantwortung zur Führung des Fahrzeugs bleibt weiterhin beim Fahrer. Die Navigations- oder Informationssysteme unterstützen den Fahrer, z.B. durch eine Routenplanung zur Erreichung des Reiseziels, Darstellung von aktuellen Verkehrskehrzeichen, Visualisierung des Parkvorgangs oder Verbesserung der Nachtsicht. Systeme die den Fahrer bei der Manövrierung des Fahrzeugs in der Längs- und Querrichtung unterstützen werden entsprechend der Definition von [8] als Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) oder Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung [177] bezeichnet. Beispiele für diese Systeme sind das Adaptive Cruise Control und die Spurhalteunterstützung. Nach [8] muss ein ADAS die folgenden Eigenschaften erfüllen:

„ADAS sind charakterisiert durch sämtliche der folgenden Eigenschaften:

- *Den Fahrer in der primären Fahraufgabe unterstützen*
- *Aktive Unterstützung zu bieten bei seitlicher und/oder Längskontrolle mit oder ohne Warnung*
- *Erkennen und Bewerten der Fahrzeugumgebung*
- *Verwendung von komplexer Signalverarbeitung*
- *Direkte Interaktion zwischen Fahrer und System“*

Im Folgenden werden die in dieser Arbeit betrachteten Fahrerassistenz- und aktiven Sicherheitssysteme beschrieben. Diese Systeme sind als Serien- oder Mehrausstattung erhältlich. Ein allgemeiner Überblick über Fahrerassistenz- und aktive Sicherheitssysteme aus Forschung oder Industrie kann in [196], [154] und [177] erlangt werden.

2.1.1. Adaptive Cruise Control

Das Adaptive Cruise Control (ACC) oder Abstandsregeltempomat regelt den Abstand zu einem vorausfahrenden Fahrzeug. Falls sich kein Fahrzeug voraus befindet wird eine Wunschgeschwindigkeit geregelt. Während bis vor einigen Jahren die untere Regelgrenze bei 30 km/h lag, ist es inzwischen möglich eine Stop-and-Go Funktion im Stau zu realisieren. Diese Funktionalitäten stellen enorme Anforderungen an

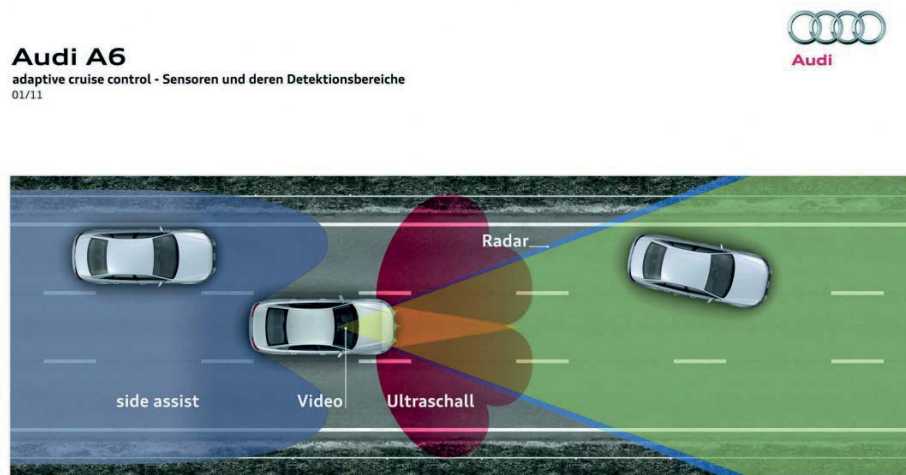


Abbildung 2.1.: Sensoren des Adaptive Cruise Control [19]

die Wahrnehmung des Fahrzeugumfelds, siehe Abbildung 2.1. Für die Erfassung weit entfernter Verkehrsteilnehmer werden Radarsysteme mit einer Reichweite von bis zu 200m verwendet. Für die Erkennung eines nahen Spurwechslers kommen Kamerasysteme zum Einsatz. Für den automatischen Stop & Go-Betrieb ist es notwendig, vor dem Anfahren zu erkennen, ob sich vor dem Fahrzeug Hindernisse befinden. Diese Erkennung wird durch Verwendung der Ultraschallsensoren und der Kamera durchgeführt. Zur Verbesserung der Regelungsfunktionen werden Straßeninformationen auf Basis der Navigationsdaten und zur Erkennung von überholenden Fahrzeugen wird das Heckradar verwendet.

2.1.2. Spurverlassenswarnung/Spurhalteunterstützung

Kollisionen nach einem Fahrspurwechsel oder dem unbeabsichtigten Verlassen der Fahrspur/Fahrbahn zählen zu den häufigsten Unfallursachen. Zur Prävention des unbeabsichtigten Verlassens der Fahrbahn wurden Systeme entwickelt, welche den Fahrer vor dem Verlassen der Fahrbahn warnen oder unterstützend bei der Spurhaltung wirken. Zur Realisierung der Systemfunktionalität werden mit einem Ka-

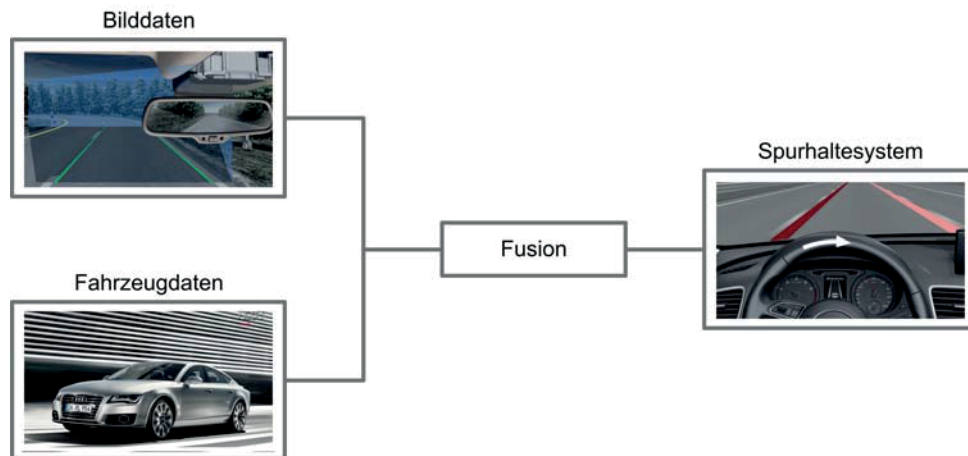


Abbildung 2.2.: Schema Spurhalteunterstützung

merasystem die Fahrspurmarkierungen oder der Übergang zwischen Fahrbahnen und/oder Grünstreifen erkannt, siehe Abbildung 2.2. Durch die Verwendung von Sensorinformationen über den Fahrzeugzustand, können mittels Modellannahmen die Zeit bzw. Distanz bis zum Verlassen der Fahrbahn bestimmt und entsprechende Gegenmaßnahmen ergriffen werden.

2.1.3. Lichtassistenzsysteme

Lichtassistenzsysteme unterstützen den Fahrer durch die Bereitstellung einer optimalen Straßenausleuchtung, siehe Abbildung 2.3. Die einfachste Ausprägung erkennt Lichtquellen und schaltet zwischen Abblend- und Fernlicht um wenn ein vorausfahrendes Fahrzeug erkannt wird. Fortgeschrittene Systeme erkennen mittels einer Kamera die relative Position eines Fahrzeugs und passen den Winkel der Scheinwerfer entsprechend an. Damit wird ein gleitender Übergang zwischen Fern- und Abblendlicht möglich. Zur Anpassung der Lichtverteilung an die aktuelle Straßenart werden prädiktive Streckendaten verwendet, so wird z.B. für eine verbesserte Ausleuchtung an Kreuzungen gesorgt.

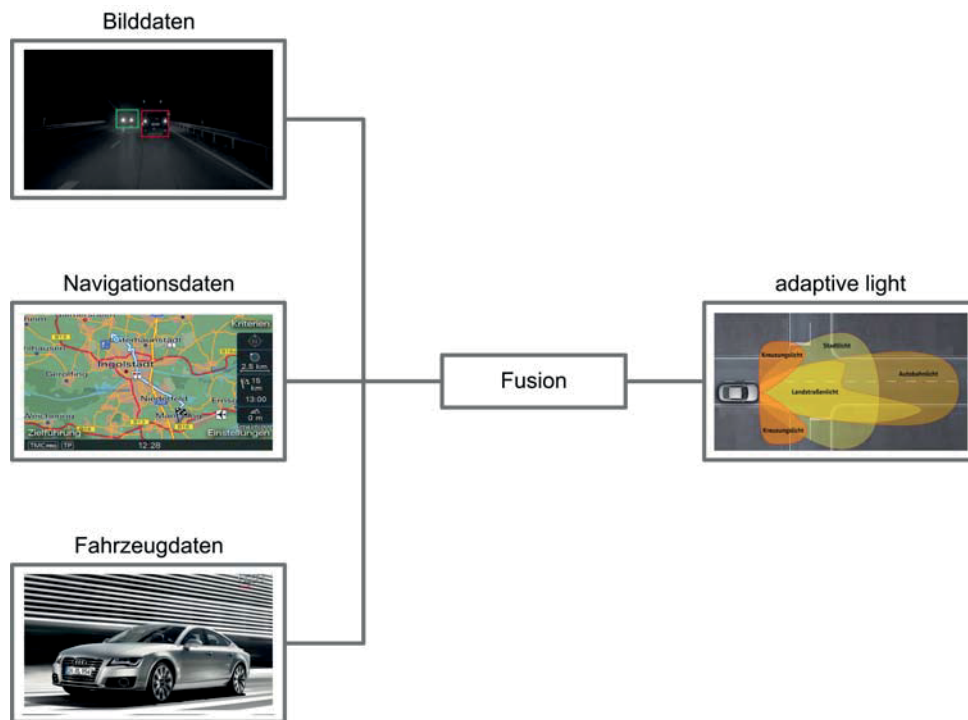


Abbildung 2.3.: Lichtassistenzsysteme