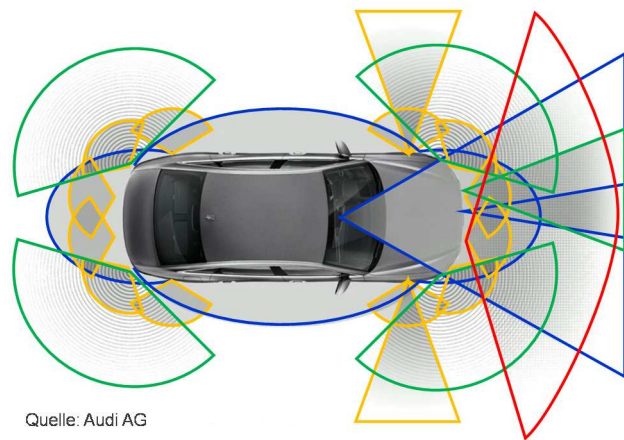


Technische Information 08/2018

Sensoren für FAS

Fahrzeugart	Pkw
Fahrzeughersteller	alle
Fahrzeugtyp	alle
Baujahr	alle
Schadenbereich	Außenhaut / FAS

Ultraschall Radar Kamera Laserscanner



Typen umfeldbeobachtende Sensoren

Quelle: Audi AG

Kontakt:

KTI GmbH & Co. KG
Kraftfahrzeugtechnisches Institut
Waldauer Weg 90a
34253 Lohfelden

Telefon: +49 561 51081 0
Telefax: +49 561 51081 13
E-Mail: info@k-t-i.de
Internet: www.k-t-i.de

© Jede Art der Vervielfältigung ist nur mit schriftlicher Genehmigung des KTI gestattet.

Einleitung

Fahrerassistenzsysteme (FAS) haben in den vergangenen Jahren zunehmende Bedeutung als Komfort- und Sicherheitssysteme im Kfz erfahren. Als Erweiterung klassischer Fahrerassistenzsysteme, wie z. B. ABS und ESP, beobachten moderne FAS mithilfe von Sensoren zusätzlich das Fahrzeugumfeld und können den Fahrer bei Gefahren warnen oder in die Fahrzeugführung eingreifen. Grundlage für die Funktion von Fahrerassistenzsystemen sind Informationen von Sensoren. Die Genauigkeit und Fehlerfreiheit der Sensordaten ist deshalb (neben Konstruktion und Auslegung) entscheidend für die Funktion eines FAS. Insbesondere sicherheitskritische FAS, welche in das Lenk- bzw. Bremsverhalten des Fahrzeugs eingreifen, sind auf korrekte Sensorinformationen angewiesen. Über die Lebensdauer eines Fahrzeuges können die Sensorfähigkeiten jedoch aus verschiedenen Gründen negativ beeinflusst werden. Gründe sind bspw. Defekte, Alterung, Demontage, Anstöße bei Unfällen sowie anderweitige Kraft- oder Temperatur-Einwirkungen.

Deshalb ist es wichtig, dass die Funktion von FAS-Sensoren und deren Sensibilität auf Störeinflüsse bekannt sind, um Unfallschäden richtig zu bewerten und korrekte Reparaturwege bestimmen zu können. „Externe“ Sensoren zur Umfeldbeobachtung sind in der Regel an der Fahrzeugaußenhaut verbaut (siehe Abbildung 1) und liegen somit im direkten Anstoßbereich bzw. sind direkt Umwelteinflüssen (bspw. Steinschlägen) ausgesetzt. Daher können sie bei Unfällen leichter beschädigt bzw. in ihrer Funktion beeinträchtigt werden.

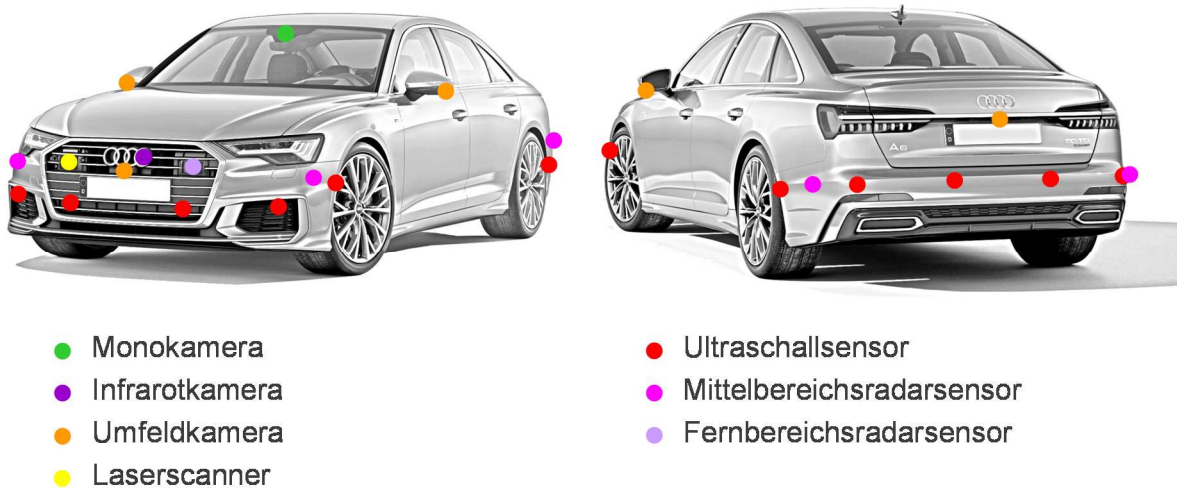


Abbildung 1: Verbaupositionen umfeldbeobachtender FAS-Sensoren an einem modernen Pkw

Werden Informationen für einen konkreten Schadenfall benötigt, ist es erforderlich, die aktuellen und fahrzeugindividuellen Herstellervorgaben einzusehen. Die Vorgaben der Fahrzeughersteller gehen den nachfolgenden Ausführungen in jedem Fall vor.

Die Umfelderkennung moderner FAS soll möglichst sämtliche relevanten Verkehrsteilnehmer, Straßenbegrenzungen bzw. -markierungen und Verkehrszeichen erkennen. Hierzu werden verschiedene Sensortechnologien einzeln oder kombiniert eingesetzt. Bei modernen Fahrerassistenzsystemen werden häufig die Informationen

© Jede Art der Vervielfältigung ist nur mit schriftlicher Genehmigung des KTI gestattet.

verschiedener Sensoren fusioniert. Damit ist es möglich, die Nachteile eines Sensors durch die Vorteile eines anderen zu kompensieren. Einen Überblick zu Vor- und Nachteilen verschiedener Sensoren gibt Tabelle 1.

Tabelle 1: Vor- und Nachteile verschiedener FAS-Sensoren

Sensor	Vorteil	Nachteil
Ultraschall	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Geringe Kosten ▪ Unproblematisch bei Dunkelheit ▪ Leicht nachrüstbar 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kurze Reichweite ▪ Witterungsempfindlich ▪ Störung durch bestimmte Geräuschquellen möglich
Radar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Relativ witterungsunempfindlich ▪ Messung der Relativgeschwindigkeit ▪ Einbau hinter Kunststoff möglich ▪ Hohe Reichweite 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Teuer ▪ Schlechte Winkelauflösung ▪ Reagiert auf metallische Objekte in der Umwelt (z. B. Schutzplanken) ▪ Einbau in anstoßgefährdete Bereiche
Kamera	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Multiple Objekterkennung ▪ Gute Auflösung ▪ Niedrige Kosten 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Witterungsempfindlich ▪ Problematisch bei Dunkelheit und Gegenlicht
Lidar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Unproblematisch bei Dunkelheit ▪ Konstante Entfernungsauflösung ▪ Geschützte Einbaulage möglich 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wasser- und schmutzempfindlich ▪ Keine Objekterkennung
Laserscanner	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Detailliertes Abbild der Umgebung ▪ Objekterkennung (Klasse, Größe, Orientierung) ▪ Erkennung von Fahrzeugen, Fußgängern, Radfahrern 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Teuer ▪ Baugröße ▪ Einbau in anstoßgefährdete Bereiche

Regensensoren

Aufbau

Der Regensensor wird auf der Innenseite der Frontscheibe meist im Bereich des Innenspiegels im Wischerfeld montiert. Er besteht wie in Abbildung 2 dargestellt aus einer IR-LED mit nachgeschalteter Streulinse, einem optischen Koppelmittel, einer Foto-Diode mit vorgeschalteter Sammellinse und ggf. einem elektronischen Steuermodul. Angebracht wird der Sensor i. d. R. von innen an die Windschutzscheibe und ist meist in der Aufnahme des Rückspiegels integriert.

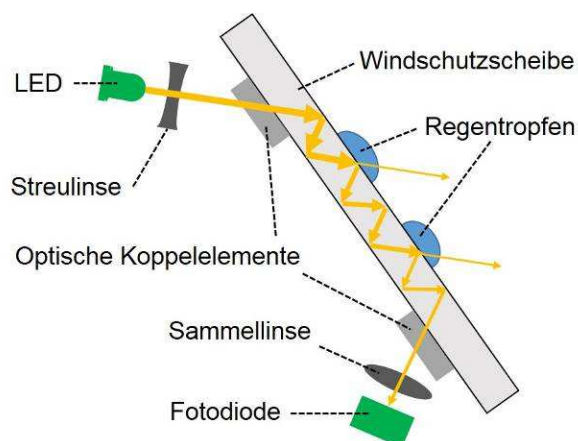


Abbildung 2: Aufbau und Funktion eines Regensensors

Funktion

Der Regensensor nutzt die Totalreflexion von Licht beim Medienübergang Glas-Luft bzw. Glas-Wasser. Mittels LED wird Infrarotlicht erzeugt, welches durch Streulinse aufgeweitet und durch ein optisches Prisma im optimalen Winkel auf die Windschutzscheibe gelenkt wird. Der Einfallswinkel des Lichts wird derart gewählt, dass das Licht am Übergang vom Glas zur Luft vollständig reflektiert wird. Innerhalb der Windschutzscheibe wird der Lichtstrahl an den Grenzschichten (Glas-Luft) mehrfach reflektiert und anschließend von einer Fotodiode empfangen. Das durch die Scheibe geleitete und an der äußeren Oberfläche reflektierte Licht wird durch eine Sammellinse gebündelt und von einer Fotodiode empfangen. Bei trockener Scheibe erreicht das Licht die Empfangsdiode in ursprünglicher Stärke. Bei Regen leiten die Wassertropfen das Licht teilweise weiter. Dadurch nimmt die Lichtreflexion innerhalb der Windschutzscheibe mit zunehmender Benetzung der Scheibenoberfläche durch Wassertropfen ab. In einem elektronischen Steuermodul werden die Signale ausgewertet und der Scheibenwischer bedarfsgerecht aktiviert. Besonders wichtig für die Funktion des Regensensors ist eine gute optische Ankopplung des Sensors an die Innenseite der Frontscheibe. Diese erfolgt durch transparente Silikonkissen, welche verhindern, dass sich ein Luftspalt zwischen Sensor und Glas bildet. Deshalb muss nach einem Tausch einer Windschutzscheibe i. d. R. das Klebematerial bzw. das Silikonplättchen erneuert werden. Um die Bildung von Kondenswasser zu vermeiden, wird der Sensor beheizt. Je nach Ausführung sind in das Regensensorgehäuse weitere Bauteile wie z. B. Beschlagsensor der Klimaautomatik oder Lichtsensoren für eine automatische Aktivierung des Fahrlichtes integriert.

Funktionsbeeinträchtigung

Wird eine Windschutzscheibe ersetzt, kann durch eine andere Glasstärke eine Fehlfunktion auftreten. Unterschiedliche Glastönungen können sich ebenfalls auf die Funktion auswirken. Werden Klebematerialien bzw. Silikonplättchen bei einem Ersatz der Windschutzscheibe nicht erneuert, kann die Funktion des Sensors ebenfalls beeinträchtigt sein. Dies ist auch der Fall, wenn der Sensor nach einem Scheibentausch nicht initialisiert wird.

Ultraschallsensoren

Ultraschallsensoren werden vorzugsweise für Einparkhilfen verwendet. Aufgrund ihrer begrenzten maximalen Reichweite ($< 10\text{ m}$) sind sie nicht für eine weitreichende Fahrzeugumfeldererkennung geeignet. Dennoch wird bei einigen Fahrzeugen mit Hilfe von Ultraschallsensoren eine Totwinkelwarnung realisiert. Hierbei wird jedoch lediglich ein Bereich unmittelbar neben und seitlich hinter dem Fahrzeug beobachtet, wodurch die Warnfunktion auf niedrige Relativgeschwindigkeiten zu anderen Fahrzeugen begrenzt ist. Ultraschallsensoren für konventionelle Einparkhilfen sind in den Stoßfängern mit Ausrichtung nach vorn bzw. hinten verbaut. Bei FAS mit Parklückenerkennung sind Ultraschallsensoren zusätzlich seitlich in den Stoßfängern und/oder in den vorderen Kotflügeln (Abbildung 3 und Abbildung 4) montiert.



Abbildung 3:
Ultraschallsensor für Parkassistenzsystem im hinteren Stoßfänger

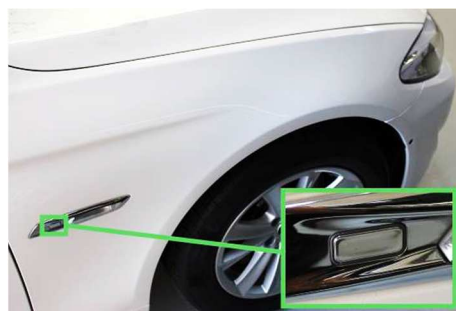


Abbildung 4:
Ultraschallsensor für Parkassistenzsystem im Kotflügel

Stoßfängerverkleidungen werden als Ersatzteile teilweise ohne die ggf. notwendigen Löcher für Ultraschallsensoren geliefert. Die Löcher müssen dann mit einem Spezialwerkzeug nachträglich eingebracht und der dazugehörige Halter auf der Innenseite verklebt werden [1]. Die dafür erforderliche zusätzliche Arbeitszeit ist in den Kalkulationssystemen noch nicht durchgehend hinterlegt und muss ggf. als „Freie Arbeitspositionen“ berücksichtigt werden. Dürfen Ultraschallsensoren gemäß Herstellervorgaben nicht nachträglich lackiert werden, erfolgt i. d. R. eine Lieferung eines werksmäßig lackierten Ersatzteiles. Ultraschallsensoren für Einparkhilfen sind im Zubehörhandel erhältlich und können relativ leicht nachgerüstet werden. Die Abbildung 5 bis Abbildung 7 zeigen Ultraschallsensoren verschiedener Zulieferer.



Abbildung 5: Bosch



Abbildung 6: Denso [2]



Abbildung 7: Valeo

Aufbau

Abbildung 8 zeigt den Aufbau eines Ultraschallsensors im Längsschnitt. Der Halter, welcher den Sensor im Stoßfänger fixiert, ist nicht dargestellt. Die Hauptkomponenten des Sensors sind das akustische Wandlerelement, die Elektronik und das Gehäuse mit elektrischer Steckverbindung. Das Wandlerelement besteht im Wesentlichen aus einem topfförmigen Aluminiumkörper (Membrantopf), auf dessen Innenboden eine Piezokeramikscheibe aufgeklebt ist. Der Membrantopf ist der von außen am Fahrzeug sichtbare Teil des Sensors. Durch eine Lackierung der Membran wird der Sensor häufig farblich an die angrenzenden Bauteile angepasst. Wichtig für die Funktion des Ultraschallsensors ist die akustische Entkopplung der Membranschwingung vom Sensorgehäuse bzw. anderer umgebender Bauteile (z. B. Stoßfänger). Deshalb wird der Membrantopf u. a. in einen Entkopplungsring aus weichem Silikon eingebettet. In der Regel wird wegen des Verbaus im Spritzwasserbereich das Gehäuse mit einem Vergussmaterial ausgefüllt, welches die Elektronik wasserdicht umschließt und gleichzeitig verhindert, dass Hohlräume das akustische Verhalten negativ beeinflussen. Die Innenseite des Membrantopfes wird zusätzlich durch Einbringen eines Silikonschaums akustisch gedämpft.

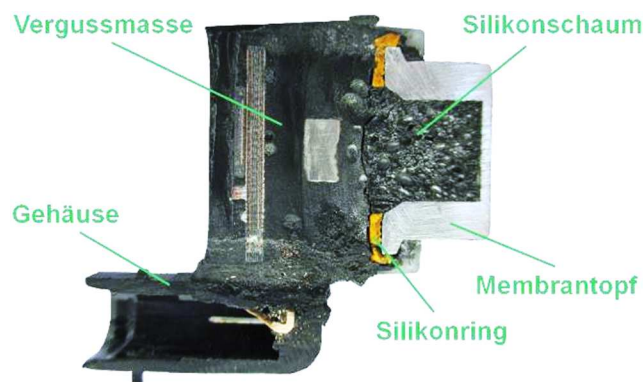


Abbildung 8:
Aufbau eines Ultraschallsensors am Beispiel Valeo



Abbildung 9:
Verspannter Ultraschallsensor

Funktion

Ultraschallsensoren senden akustische Wellen aus, welche mit Frequenzen von 40 kHz bis 50 kHz oberhalb des vom Menschen wahrnehmbaren Bereiches liegen. Erzeugung und Empfang von Ultraschall geschieht durch Ultraschallwandler, welche mittels piezoelektrischen Effekt ein elektrisches Signal in ein Schallsignal wandeln können und umgekehrt. Vereinfacht kann dieses Prinzip mit einer Kombination aus Lautsprecher und Mikrofon verglichen werden. Zunächst arbeitet der Ultraschallsensor als Aktor und sendet Schallwellen in die umgebende Luft aus. Die vom Hindernis reflektierten Schallwellen versetzen die inzwischen beruhigte Membran wieder in Schwingung, welche als elektronisches Signal abgefasst wird. Überschreitet die Amplitude der Schwingungen einen Schwellwert, wird das empfangene Signal als gültiges Echo gewertet. Die Interpretation der Sensordaten erfolgt durch Messen der Zeitdauer zwischen Aussenden der Schallwellen bis zum Empfangen des Echos. Mit Hilfe dieser Zeitspanne kann unter Berücksichtigung der Luftschallgeschwindigkeit die Entfernung zum reflektierenden Hindernis berechnet werden.

Für lückenlose Erfassungsbereiche mit möglichst wenigen Sensoren wird ein großer horizontaler Öffnungswinkel von ca. 120° bis 140° gewählt [3]. Dadurch wird zusätzlich zur Abstandsmessung – bspw. durch Trilateration – eine Positionsbestimmung eines Hindernisses relativ zum Fahrzeug möglich. Um bei unebenen Fahrbahnen keine Pseudo-Hindernisse (z. B. Echos vom Boden) zu detektieren, wird der vertikale Öffnungswinkel geringer ausgelegt (ca. 60° bis 70°). Eine derartige keulenförmige Abstrahlcharakteristik des Sensors wird durch unterschiedliche Wandstärken des Membrantopfes erreicht.

Funktionsbeeinträchtigung

Wie bei anderen Wellen auch tritt bei Ultraschall materialabhängig Reflexion, Absorption, Transmission, Brechung, Beugung und Interferenz auf. Objekte aus festen Materialien reflektieren Schallwellen annähernd gleich stark. Weiche Hindernisse (z. B. Personen) reflektieren den Schall weniger, sodass die Messreichweite reduziert sein kann. Objekte, die unter- oder oberhalb der Schallkeulen liegen (z. B. Bordsteine), werden nicht erfasst. Weiterhin können Schallwellen durch starken Regen, Schneefall und Wind gestört werden. Auch starke akustische Störquellen (Pressluft und metallische Reibgeräusche z. B. von Schienenfahrzeugen) im Bereich der Ultraschallfrequenz in unmittelbarer Fahrzeughöhe können das Signal stören. Die von Ultraschallsensoren gemessenen Abstände zu Hindernissen werden durch Temperatur beeinflusst, weil sich temperaturabhängig die Luftdichte und somit die Schallausbreitungsgeschwindigkeit ändert. Deshalb können an Grenzschichten zwischen unterschiedlich warmen Luftschichten (z. B. Einfahrt eines kalten Fahrzeugs in eine warme Garage) starke Brechungen der Schallwellen auftreten. Dies kann zur Anzeige von Phantomhindernissen führen.

Ist der Kotflügel im Bereich der Ultraschallsensoren für den Parkassistenten beschädigt, kann dies eine falsche Ausrichtung des Sensors und damit eine fehlerhafte Erkennung von Parklücken zur Folge haben. Für eine einwandfreie Funktion müssen Ultraschallsensoren korrekt in ihrer Halterung und dem Entkopplungselement sitzen. Schallbrücken zwischen Sensor und Stoßfänger (z. B. durch Lack) müssen vermieden werden. Daher sind Stoßfänger und Sensor getrennt zu lackieren. Oftmals dürfen deshalb Ultraschallsensoren gemäß Herstellervorgaben nicht nachträglich lackiert werden. Die Lackschicht darf am Membrantopfumfang nicht zu dick sein, um zu hohen seitlichen Druck auf die Membrane und damit verändertes Schwingungsverhalten zu vermeiden. Der Sensor muss verspannungsfrei montiert sein. Auch Schmutz-, Schnee- oder Eisschichten können eine Schallbrücke zwischen Sensormembran und Stoßfänger bilden, welche das Schwingungsverhalten verändern kann. Sitzt das Entkopplungselement (z. B. Silikonring) nicht richtig oder ist gequetscht (vgl. Abbildung 9), kann der Sende- und Empfangsbetrieb beeinträchtigt werden. Der Sensorhalter muss in ausreichend großer Bohrung im Stoßfänger ausgerichtet und zentriert sein, damit kein zu hoher seitlicher Druck auf den Ultraschallsensor einwirkt.

Alterungseffekte piezoelektrischer Keramiken durch allmähliche Depolarisation setzen bereits unmittelbar nach dem Polarisieren ein, sind über die gewöhnliche Nutzungsdauer eines Pkw jedoch vernachlässigbar gering [3]. Weitere thermische, elektrische und mechanische Belastungen beschleunigen die Alterung.

Radar

Radarsensoren erkennen Objekte und messen Relativgeschwindigkeit und Position in Bezug auf das eigene Fahrzeug. Verwendet werden Radarsensoren derzeit hauptsächlich für Abstandsregelsysteme, autonome Notbremsysteme, Totwinkel- bzw. Spurwechselwarnung und Ausparkassistenten für Rückwärtsfahrt. Radarsensoren (**R**adio **D**etection and **R**anging) senden elektromagnetische Wellen aus. Die von einem Hindernis reflektierten Wellen werden empfangen und ausgewertet. Die Signalstärke der Radarreflexion am Empfänger hängt vom Abstand zwischen Sensor und Ziel, der Art des Ziels, und vor allem aber von dessen Geometrie und Orientierung ab. So kann ein Hindernis (z. B. ein Pkw) grundsätzlich eine starke Rückstreuung haben, dessen reflektiertes Signal aber bei einer leichten Drehung des Hindernisses in größerer Entfernung völlig einbrechen.

Derzeit im Straßenverkehr eingesetzte Radarsensoren unterscheiden sich hinsichtlich der verwendeten Frequenzbänder, deren Aufbau und Funktionsumfang. Je nach Anforderungen des Automobilherstellers (Bauraum, Kosten, Genauigkeit und Reichweite) werden Fern-, Mittel- und Nahbereichsradarsensoren eingesetzt. Der Fernbereichsradarsensor (engl. Long-Range-Radar, LRR) arbeitet im Frequenzbereich zwischen 76 GHz und 77 GHz und hat einen Erfassungsbereich bis zu 250 m. Ein weiterer Vorteil der LRR-Technik liegt in der guten Abstandsauflösung. Das LRR findet seine Hauptanwendung daher im Frontbereich. Der Nahbereichsradarsensor (engl. Short-Range-Radar, SRR) arbeitet im Frequenzbereich zwischen 24,05 GHz und 24,25 GHz bzw. 21,65 GHz und 26,65 GHz mit einer Reichweite von bis etwa 70 m. Als kostengünstige Variante haben sich zudem Mittelbereichsradarsensoren (engl. Mid-Range-Radar, MRR) mit einer Reichweite von maximal ca. 160 m etabliert.

Prinzipiell können Radarstrahlen elektrisch nichtleitende Gegenstände durchdringen. Somit können Radarsensoren hinter Abdeckungen montiert werden. Aufgrund unterschiedlicher Frequenzbereiche von Nah-, Mittel- und Fernbereichsradarsensoren ergeben sich jedoch unterschiedliche Störempfindlichkeiten. So ist im Frequenzbereich von Fernbereichsradarsensoren bei Lackfarben mit einem hohen Anteil von Metallpartikeln (z. B. Silber-Metallic) eine Platzierung hinter lackierten Kunststoffflächen mit hohen Reflexionen verbunden. Deshalb wird eine Integration der LRR-Sensoren hinter in Wagenfarbe lackierten Flächen weitgehend vermieden. Durch die im Vergleich zu Fernbereichsradarsensoren etwa dreifache Wellenlänge ist der Einfluss von Lackschichten auf Nahbereichsradarsensoren geringer. Hierdurch ist ein unauffälliger Einbau hinter lackierten Kunststoffflächen möglich. Bei Verbau des Sensors hinter einer Blende sind demnach Einschränkungen zu beachten [4]. Es kommen hinsichtlich des Einbaus bzw. der Sensorabdeckung verschiedene Konzepte zum Einsatz. Kunststoffe als Abdeckung sind problemlos, es sei denn, die Dicke beträgt ein Vielfaches der Hälfte der Wellenlängen (bei 77 GHz ≈ 2 mm) [4]. Das heißt, dass im Fall eines verdeckten Einbaus ein 77-GHz-Radar aufgrund der kleineren Wellenlänge beim Durchdringen von Bauteilen, wie zum Beispiel Stoßfängern, empfindlicher ist.

Häufig werden Radarsensoren in offener Bauweise an der Front im unteren Teil des Stoßfängers (z. B. anstelle der Nebelscheinwerfer) montiert (vgl. Abbildung 10).

© Jede Art der Vervielfältigung ist nur mit schriftlicher Genehmigung des KTI gestattet.

Werden die Sensoren hinter einer Abdeckung („Radom“) montiert, gestaltet sich die Sensorintegration designneutraler. Das Radom ist derart ausgelegt, dass sie die Strahlungscharakteristik und die abgestrahlte bzw. empfangene Leistung nicht negativ beeinflusst. Als Einbauort für abgedeckte Fernbereichsradarsensoren wird häufig der Kühlergrill gewählt (vgl. Abbildung 11). Nahbereichsradarsensoren werden üblicherweise in den seitlichen Bereichen des Frontstoßfängers (z. B. in der Nähe der Blinker bzw. Nebelscheinwerfer) verbaut. Mit Einzug der Totwinkelwarnung werden auch Nahbereichsradarsensoren im hinteren seitlichen Bereich des Fahrzeugs integriert (vgl. Abbildung 12).



Abbildung 10:
Offen eingesetzter Radarsensor
(Audi A4)



Abbildung 11:
Abgedeckter Radarsensor
(Mercedes-Benz E-Klasse)



Abbildung 12:
Radarsensor für Spurwechsel-
assistent hinter Stoßfänger-
abdeckung (BMW 5er)

Radarsensoren mit Frequenzen von 24 GHz werden vorwiegend am Fahrzeugheck verbaut. Diese Sensoren sind hinsichtlich Abdeckungen unempfindlicher und können daher verdeckt hinter Stoßfängern verbaut werden. Für Funktionen wie Spurwechselwarnung und Ausparkassistent ist die geringere Abstandsauflösung von 24 GHz-Radarsensoren ausreichend.

Aufbau

Der Aufbau verschiedener Radarsensoren unterscheidet sich zum Teil stark. Bei neueren Radarsensoren wird versucht, die Anzahl der Bauteile und den Bauraum zu verringern, um Kosten zu senken sowie die mechanische Robustheit zu erhöhen. Grundsätzlich verfügen Radarsensoren über einen Bereich zur Erzeugung, Regelung und Aussendung einer Hochfrequenz (HF). Über Antennen werden die von Objekten reflektierten elektromagnetischen Wellen empfangen und von einer Auswerteeinheit zu Informationen verarbeitet. Das Gehäuse besteht aus Aluminium oder Kunststoff und ist i. d. R. über einen Halter an drei Punkten am Fahrzeug befestigt. Bei einigen Fahrzeugen lässt sich der Sensor über die Verschraubung sowohl horizontal als auch vertikal in seiner Ausrichtung justieren. Eine integrierte Heizung gewährleistet die Sensorverfügbarkeit auch bei schlechten Witterungsbedingungen (Schnee und Eis).



Quelle: Robert Bosch GmbH

Abbildung 13:
Bosch LRR4



Quelle: Continental Teves AG & Co.oHG

Abbildung 14:
Continental ARS 510



Quelle: HELLA GmbH & Co. KGaA

Abbildung 15:
Schnittdarstellung eines Hella
24 GHz-Radarsensors

Funktion

Der Radarstrahl wird von der Sendeantenne abgestrahlt und vom Sensor gebündelt als „Radarkeule“ ausgesandt. Die an einem Objekt reflektierten elektromagnetischen Wellen werden von der Empfangsantenne wieder aufgefangen. Aus der Frequenzverschiebung zwischen gesendetem und empfangenem Signal (Dopplereffekt) sowie der Zeitverzögerung wird die Relativgeschwindigkeit und Entfernung zu erkannten Objekten im Fahrzeugumfeld berechnet. Aus dem Vergleich der an den Antennenelementen gemessenen Radarsignale (Amplitude und Phase) kann auf die Position von Objekten geschlossen werden. Die Winkelmessung erfolgt durch eine kontinuierliche Scanbewegung der Radarkeule oder durch das Monopuls-Verfahren mit einer Doppelantennen-Anordnung.

Funktionsbeeinträchtigung

Bei Radarsensoren, welche hinter Abdeckungen verbaut sind, können nachträglich aufgebrachte Lackschichten auf den abdeckenden Bauteilen hohe Reflexionen verursachen. Während nichtmetallischer Lack, Klarlack und Grundierungen weniger problematisch sind, kann Metallic-Lack aufgrund metallischer Partikel zu Problemen durch Reflexion der elektromagnetischen Wellen führen [4]. Einen besonders hohen Metallanteil haben häufig silberfarbige Metallic-Lacke. Insbesondere bei Sensoren mit Frequenzen von 76 GHz bis 77 GHz können sich nachträglich aufgebrachte metallhaltige Lackschichten als kritisch erweisen. Durch die größere Wellenlänge ist der Einfluss der Lackschichten bei 24 GHz-Radarsensoren geringer. Unter ungünstigen Bedingungen können jedoch auch bei 24 GHz-Nahbereichsradarsensoren lackbedingte Störungen durch Reflexionen auftreten. Eine verminderte Signalleistung, z. B. durch erhöhte Reflexion, führt in erster Linie zur Reichweitenreduktion des Radarsensors. Durch späteres Erkennen eines Hindernisses kann es zu einer zeitverzögerten Reaktion der Fahrerassistenzsysteme – z. B. eines autonomen Notbremssystems – kommen.

Über die Lebensdauer eines Fahrzeuges kann sich die Ausrichtung eines Sensors aus verschiedenen Gründen verändern. Ursachen hierfür können eine Demontage, ein Ersatz, ein Unfall oder andere äußere Krafteinwirkungen sein. Die systeminternen Algorithmen stützen sich dann möglicherweise auf fehlerhafte Informationen und können zu falschen Reaktionen des FAS führen. Eine vertikale Fehlaustrichtung führt zu einem reduzierten Erfassungsbereich, nicht aber zu falsch berechneten

Abstandswerten in Form systematischer Messfehler (Abbildung 16, links). Eine seitliche Fehlausrichtung kann dagegen zu falsch berechneten Abständen und fehlerhafter Positionsbestimmung von Objekten führen und somit die Funktion eines FAS beeinträchtigen (Abbildung 16, rechts, [5]). Wird vom FAS (z. B. durch Offset-Ermittlung im Betrieb) ein verstellter Sensor erkannt, erfolgt i. d. R. eine Fehlermeldung im Kombiinstrument und ein Fehlerspeichereintrag im Steuergerät und/oder das System schaltet selbstständig ab.

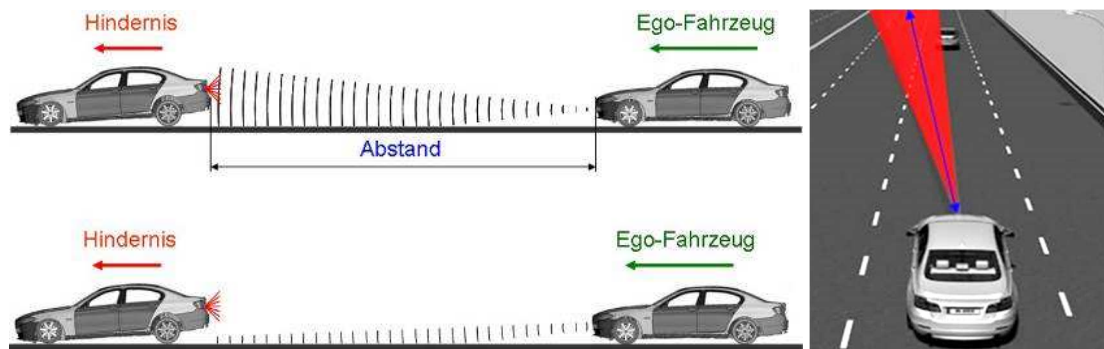


Abbildung 16: Vertikale und horizontale Fehlausrichtung

Eine veränderte Strahlungscharakteristik von Radarabdeckungen (z. B. durch Kratzer und/oder Brüche im Radom, Sensorgehäuse und Stoßfänger) hat vor allem Fehler in der Bestimmung der Empfangsrichtung zur Folge. Im Extremfall werden die Radarstrahlen derart stark abgelenkt, dass vorausfahrende Fahrzeuge auf der Nebenspur detektiert werden. Fehlverhalten der auf diese Informationen angewiesenen FAS (z. B. AEB und ACC) können die Folge sein. Starker Regen kann eine starke Dämpfung elektromagnetischen Strahlen und einen erhöhten Störpegel verursachen und damit eine erhebliche Reichweitenreduzierung nach sich ziehen. Es können aber auch Scheinziele erkannt werden, wenn z. B. Schwallwasser anderer Fahrzeuge die Radarstrahlen reflektieren.

Lidar

Lidar (**L**ight **D**etection and **R**anging) ist ein optisches Verfahren zur Ortung bzw. Entfernungsmessung von Objekten. Lidarsensoren werden häufig auf der Innenseite der Windschutzscheibe innerhalb des vom Scheibenwischer gereinigten Bereiches montiert. Bei Platzierung des Lidarsensors an der Außenhaut des Fahrzeugs (z. B. in der Kühlermaske) ist die Gefahr von Verschmutzung größer, wodurch die Sensorleistung negativ beeinflusst werden kann.

Aufbau

Für die Abstandsmessung wird mittels einer oder mehrerer Dioden Licht emittiert und reflektierte Anteile mit Hilfe von Fotodioden wieder empfangen. Intensives Sonnenlicht kann eine Blendung des Lidarsensors verursachen. Deshalb werden durch geeignete hardwareseitige Filtermaßnahmen Gleichlichtanteile der Sonneneinstrahlung unterdrückt.

Funktion

Lidarsensoren senden Lichtstrahlen im nicht sichtbaren ultravioletten bzw. infraroten Spektrum oder sichtbares Licht aus. Die ausgesendeten Lichtpulse werden an einem Hindernis reflektiert und anschließend vom Lidarsensor wieder empfangen. Aus der Zeit vom Aussenden des Lichtes bis zum Empfangen des reflektierten Signals wird (analog zum Ultraschall und Radar) durch Laufzeitmessung die Entfernung abgeleitet. Es sind Messfrequenzen bis zu 100 MHz möglich. Die Relativgeschwindigkeit zu einem Objekt wird durch Differenzieren des Abstandes aus zwei aufeinanderfolgenden Messungen (Phasenverzug) ermittelt.

Die Leistungsfähigkeit von Lidarsensoren hängt maßgeblich von der Empfindlichkeit des Empfängers (Fotodioden) und der Intensität des ausgestrahlten Lichtpulses ab. Moderne Sensoren variieren die Empfindlichkeit des Empfängers dynamisch, um atmosphärische Störungen (z. B. Nebel) zu kompensieren. Aufgrund von Anforderungen an die Augensicherheit ist die Pulsleistung jedoch beschränkt. Im Kfz werden nur Lidarsensoren verbaut, welche der Laserschutzklasse 1 entsprechen.

Funktionsbeeinträchtigung

Je nach Einbauort kann eine Beeinträchtigung der Sensorperformance durch Verunreinigungen (z. B. Insekten) auf dem Sensor erfolgen.

Laserscanner

Der Laserscanner ist eine Weiterentwicklung des Lidarsensors, ermöglicht jedoch eine Objekterkennung (Klassifizierung, Größe, Orientierung) in einem großen Erfassungsbereich. Serienmäßig wurde ein Laserscanner in einem Pkw erstmals von Valeo eingeführt und im unteren Bereich des Stoßfängers des Audi A8 eingebaut. Die Vorteile gegenüber der herkömmlichen Lidar-Technologie bestehen in einer höheren Auflösung, Reichweite, breiteren Erfassungsbereich und Objekterkennung sowie -verfolgung. Der Trend zukünftiger Laserscanner geht zur Halbleiterlösung ohne mechanische Komponenten (bspw. rotierender Spiegel), der sogenannten Solid-State-Technologie. Vorteil dieser Systeme ist, dass sie kompakter, robuster, flexibler und günstiger werden.

Aufbau

Grundsätzlich besteht ein mechanischer Laserscanner entsprechend Abbildung 17 aus einem Laser, einem bspw. rotierenden Spiegel zur Strahlableitung und einer Empfangseinheit bestehend aus Empfangsdioden, die sich hinter einer Abdeckung und in einem Gehäuse befinden.

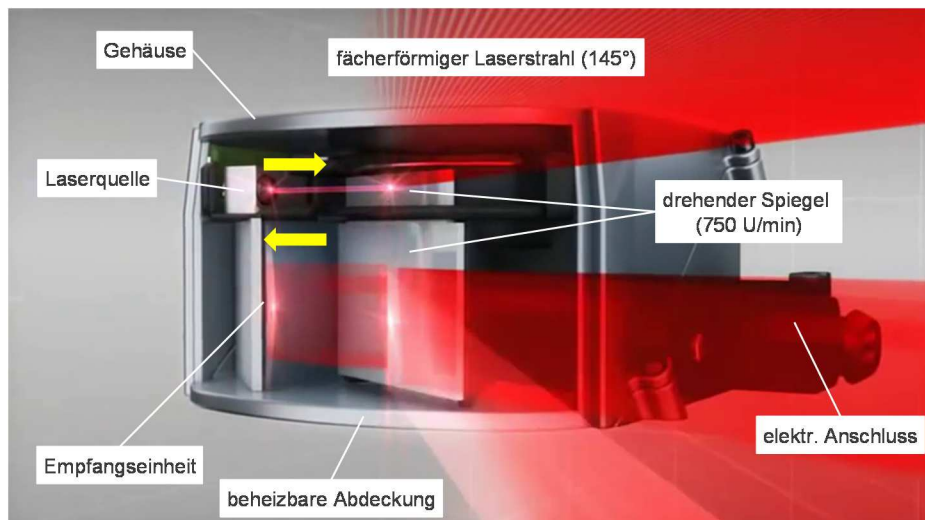


Abbildung 17: Aufbau eines Laserscanners am Beispiel Valeo SCALA

Funktion

Ähnlich wie beim Lidar werden mehrere gepulste Laserstrahlen ausgesendet. Durch die Ablenkung des von der Laserquelle ausgesandten Laserstrahls über einen großen Öffnungswinkel (bspw. 145° beim Valeo Scala) mit einer hohen Frequenz wird eine Vielzahl von Laserstrahlen emittiert, welche von der Umgebung reflektiert werden. Die reflektierten und detektierten Strahlen werden als Punktwolke zusammengesetzt, aus der ein detailliertes Abbild der Umgebung dargestellt werden kann.

Der Laserscanner SCALA von Valeo arbeitet mit einem Infrarotlaser der Wellenlänge von 905 nm und verteilt Lichtpulse in vier horizontalen Ebenen auf ein Sichtfeld von 145° horizontal bzw. 3,2° vertikal. Die Reichweite beträgt bis zu 80 m. Die Größe des Sensorbauteils beträgt 105 x 60 x 100 mm. Bei schlechtem Wetter wird seine strahlendurchlässige Frontabdeckung selbsttätig gereinigt und ggf. beheizt.

Funktionsbeeinträchtigung

Ähnlich wie bei anderen Abstandssensoren (Radar, Ultraschall, Kamera) kann durch äußere Einflüsse die Funktion beeinträchtigt werden. Insbesondere können Nebel und Gischt aber auch andere Lichtquellen das Lasersignal dämpfen und die Reichweite reduzieren. Auch die Lichtreflektivität von Objekten und die Form ihrer Oberfläche hat Einfluss auf Präzision, Zuverlässigkeit und Arbeitsbereich. Durch die Position im unteren Stoßfänger ist die Abdeckung stärkerem Verschleiß (Abrasion) ausgesetzt, als bspw. ein starrer Lidar hinter der Windschutzscheibe.

Kamera

In den letzten Jahren ist ein starker Trend hin zu kamerabasierten FAS zu beobachten. Gründe hierfür sind vor allem ein breites Funktionsspektrum und sinkende Preise von Kameras. Je nach geforderter Funktion werden unterschiedliche Kamerasysteme eingesetzt. Hinsichtlich Aufgabe und Konstruktion können Kameras wie folgt unterschieden werden:

© Jede Art der Vervielfältigung ist nur mit schriftlicher Genehmigung des KTI gestattet.

- Kameras im sichtbaren Spektralbereich: Die farbsensitiven und dynamischen Bilder werden dem Fahrer nicht angezeigt sondern durch spezielle Algorithmen ausgewertet (Bildverarbeitung). Die FAS-Funktion wird direkt aus dem Kamerabild abgeleitet (z. B. Spurverlassenswarner, automatische Fernlichtfunktion). Neuere Systeme können Objekte kategorisieren und somit z. B. Fußgänger erkennen. Auf Grundlage dieser Informationen kann der Fahrer gewarnt werden oder das FAS über Aktoren in die Fahrzeugführung eingreifen.
- Kameras im infraroten Spektralbereich verfügen über spezielle Filter, sodass das Kamerabild nur für diese Wellenlänge erzeugt wird (z. B. Nachtsichtsysteme).
- Umfeldkameras decken einen großen Blickwinkel ab und zeigen dem Fahrer das aufgenommene Bild nach Bearbeitung durch den Bildverarbeitungsrechner auf einem Display an.

Aufbau

Die wichtigsten Bestandteile einer Kamera sind Optik, Bildsensor, Leiterplatte, spezielle Filter (z. B. Infrarot- und UV-Filter) und weitere elektronische Bauteile (vgl. Abbildung 18). Die Optik besteht aus Linsen, welche in einem Objektiv integriert sind. Für FAS kommen nur Objektive mit festen Brennweiten zum Einsatz. Das Kameraobjektiv besteht i. d. R. aus einem Metall- oder Kunststoffgehäuse, welches gegen eindringende Feuchtigkeit versiegelt ist. Um Streulichteinflüsse zu minimieren, ist das Gehäuse vor dem Objektiv oftmals dunkel gefärbt. Alle optischen Oberflächen sind mit Antireflexionsbeschichtungen versehen, um störende Bildartefakte zu verhindern. Ist eine Kamera hinter der Windschutzscheibe montiert, wird häufig eine Streulichtblende zwischen Kameramodul und Windschutzscheibe eingesetzt, um Reflexionen an den Scheibengrenzflächen und dem Gehäuse zu vermeiden. Bei Kameras mit direkten Kontakt zur Umwelt (z. B. Surround View-Kameras in Kühlermaske, Außenspiegel und Heckklappe, vgl. Abbildung 20 bis Abbildung 22) wird das Gehäuse speziell gegen eindringende Feuchtigkeit versiegelt.



Abbildung 18:
Monokamera ohne Gehäuse
(am Bsp. Kostal)



Abbildung 19:
Hinter Windschutzscheibe
montierte Monokamera mit
Streulichtblende und
Regensensor



Abbildung 20:
Kühlerabdeckung mit Umfeld-
kamera (grüne Markierung)
und Infrarotkamera (rote
Markierung)



Abbildung 21:
Umfeldkamera an der
Unterseite des Außenspiegels



Abbildung 22:
Rückfahrkamera in Heckklappe



Abbildung 23:
Stereokamera

Funktion

Über die Optik wird ein Bildpunkt auf den CMOS-Bildsensor („Imager“) projiziert, welcher wesentlich die Auflösung, Dynamik, Blickfeld, Farbwiedergabe und Empfindlichkeit beeinflusst. Er digitalisiert die Szene und stellt ein Rohbild zur Verfügung. Dieses wird entweder für die Darstellung auf einem Bildschirm aufbereitet (Entzerrung, Helligkeitsabgleich, etc.) oder durch Suche nach bestimmten Merkmalen in einem Bild (z. B. Verkehrszeichen, Fußgänger) ausgewertet. Die Ergebnisse werden dann von einer FAS-Funktion verwendet. Die Anforderungen an den Imager können sich je nach FAS-Funktionen unterscheiden. So sind für eine Fahrspurerkennung eine hohe Dynamik und damit eine kurze Belichtungszeit erforderlich, während das sichere Erkennen von (gepulsten) LED-Wechselverkehrszeichen längere Belichtungszeiten voraussetzt. Anzeigende Systeme müssen auch bei Dunkelheit und bei nasser Fahrbahn mit Spiegelungen verfügbar sein.

Ablagerungen von Staub und Streusalz im Winter können zu einer derartigen Verschlechterung der Bildqualität führen, dass FAS-Funktionen nicht mehr einwandfrei möglich sind. Daher müssen alle Kamerasysteme vor Schmutz geschützt werden. Bei einigen Fahrzeugen werden die Kameras bspw. hinter Blenden montiert, welche die Kamera nur bei aktiver Funktion freigeben und so die Verschmutzung deutlich reduzieren (häufig bei Umfeldkameras in Kühlermasken und Heckklappen). In Surround View-Systemen kommen fast ausschließlich Kameramodule mit einem horizontalen Blickfeld von mehr als 180° zum Einsatz, damit eine 360°-Darstellung des Fahrzeugumfelds erzielt werden kann. Um aus den Einzelbildern ein Gesamtbild zu berechnen, ist eine Überlappung zwischen den Blickfeldern der Kameras notwendig.

Stereokameras (vgl. Abbildung 23) verfügen über zwei Kameralinsen und Bildsensoren. Aus dem Vergleich der beiden gleichzeitig aufgenommenen Bilder wird eine dreidimensionale Szene generiert, aus der sich Abstände errechnen lassen. Somit können zusätzliche Funktionen wie ein kamerabasierter Notbremsassistent oder eine automatische Abstandsregelung realisiert werden.

Kameras passiver Nachtsichtassistenten (FIR)¹

Lebewesen emittieren eine Wärmestrahlung, deren Wellenlängen bei typischen Temperaturen zwischen 7,5 µm und 14 µm liegen. Eine Ferninfrarot-Kamera (FIR; vgl. Abbildung 24) wandelt die thermische Strahlung in elektrische Spannung um und stellt diese mithilfe einer Bildverarbeitungssoftware als sichtbares Bild auf einem Display dar. Je höher die Temperatur, umso heller wird ein Pixel (aufgrund höherer elektr. Spannung) dargestellt. Deshalb sind warme Objekte gegenüber kälteren (z. B. Menschen und Tiere, aber auch warme Bauteile anderer Kfz) im Bild heller hervorgehoben.

Die Bestandteile einer FIR-Kamera zeigt Abbildung 25. In das vordere Gehäuseteil (1) ist eine ringförmige Heizung (2) integriert, welche Vereisung am Schutzglas (3) verhindert. Das Schutzglas ist mit einer geschraubten Kunststoffabdeckung (4) befestigt. Im mittleren Gehäuseteil (5) befindet sich die Optik (6) mit dem Bildsensor. Die Elektronik und deren Anschlüsse sind im hinteren Gehäuseteil (7) untergebracht.



Abbildung 24: Infrarotkamera (Autoliv)

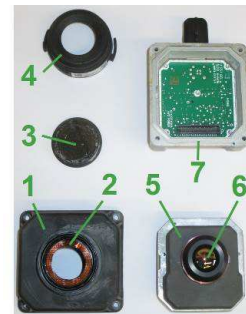


Abbildung 25: Bauteile einer Infrarotkamera (Autoliv)

Da Wärmestrahlung Kunststoffe und Glas schlecht durchdringen kann, ist eine Montage z. B. hinter der Frontscheibe nicht möglich. Die Kamera muss deshalb in der Außenhaut verbaut und das Objektiv durch spezielle Quarz-Gläser (Germanium oder Germanium-Gemische) vor äußeren Einflüssen geschützt werden. Durch Montage an der Fahrzeugfront sind FIR-Kameras Schmutz, Witterung und Steinschlägen ausgesetzt. Bei einigen Systemen können deshalb die Schutzgläser bei Beschädigung separat ersetzt werden. FIR-Kameras müssen entfernt von starken Wärmequellen verbaut werden, da die Streuung der Wärmestrahlung das Bild beeinflussen würde. Zur Abschirmung von Wärme ist der Bildsensor zudem wärmeisoliert. Eine Reinigungsdüse ist mit dem Halter der Kamera verschraubt. Der Preis ist für passive FIR-Systeme gegenüber aktiven Systemen höher und die Bildauflösung geringer. Passive Systeme senden jedoch keine IR-Strahlung aus, weshalb kein Risiko für die Augensicherheit besteht und die Leistungsaufnahme gering ist. Die Reichweite der Kamera ist nicht an die der Scheinwerfer gebunden, bei Dunst und Nebel sinkt sie aber. Entgegenkommende Fahrzeuge können nicht blenden. Objekte mit fehlender Temperaturdifferenz (z. B. Fahrbahnmarkierungen und Verkehrszeichen) werden für gewöhnlich nicht angezeigt.

¹ Da sich die Wellenlänge deutlich von der des sichtbaren Lichtes unterscheidet, wird diese Strahlung auch als Fern-Infrarotstrahlung (FIR) bezeichnet.

Kameras aktiver Nachtsichtassistenten NIR²

Aktive Nachtsichtassistenten nutzen infrarotes Licht (Wellenlänge ca. 800 nm bis 1100 nm). Sie beleuchten das Vorfeld des Fahrzeugs mit NIR-Scheinwerfern zusätzlich fernlichtartig aus, ohne andere Verkehrsteilnehmer zu blenden. Die ausgesandte Infrarotstrahlung wird an den Objekten im Vorfeld des Fahrzeugs reflektiert und von einer infrarotempfindlichen CMOS-Kamera aufgenommen, deren Empfindlichkeit für die entsprechenden Wellenlängen optimiert ist. Die Kamera wird häufig in der Kühlermaske oder im oberen Bereich der Windschutzscheibe montiert. Sichtbares Licht wird ebenfalls aufgenommen. Deshalb werden bei NIR-Systemen auch bspw. Fahrbahnmarkierungen oder Verkehrszeichen in der Bildanzeige erkennbar. An die Optik der Kamera werden wegen der hohen notwendigen Dynamik des „Imagers“ entsprechend hohe Ansprüche gestellt. Da infrarotes Licht von Lebewesen nicht wahrgenommen wird, reagieren die Pupillen nicht durch schützendes Verengen. Der Einsatz der Infrarot (IR)-Strahler erfordert deshalb spezielle Maßnahmen zum Augenschutz. So werden die IR-Strahler nur bei eingeschalteten Scheinwerfern oberhalb einer Mindestgeschwindigkeit aktiviert. Zudem darf ein maximaler Abstand zwischen Scheinwerfer und IR-Strahler nicht überschritten werden. IR-Strahler werden aus diesem Grund häufig in die Scheinwerfer integriert. Ist die Kamera hinter der Frontscheibe im Innenraum montiert, ist sie weitgehend vor äußeren Einflüssen (Witterung, Schmutz, Anstöße durch Unfälle und Steinschlag) geschützt und das Blickfeld wird vom Scheibenwischer bei Bedarf gereinigt. Um eine ausreichende Signalstärke zu erhalten, wird im Bereich der Kamera anstatt der üblichen wärmedämmenden Frontscheibe, Klarglas ohne Wärmedämmung verbaut, um keine zusätzliche Dämpfung der NIR-Strahlung zu erzeugen. Der Bildeindruck aktiver Systeme ist vergleichbar mit dem gewohnten visuellen Eindruck, ohne jedoch ein Farbspektrum wiederzugeben. Nachteil der aktiven Strahlaussendung ist, dass sich entgegenkommende Fahrzeuge mit NIR-System gegenseitig blenden können.

Funktionsbeeinträchtigung

Kamerasysteme können durch Reparaturen an der Karosserie bzw. durch einen Scheibentausch in ihrer Ausrichtung verstellt werden. Dies kann zu Positionsfehlern und falsch ermittelten Abständen zwischen Fahrzeug und Objekten in der Umgebung führen. Die Dynamik der Optik wird z. B. durch Streulicht negativ beeinflusst. Bei starkem Gegenlicht können Effekte wie Geisterbilder und Blendenflecken auftreten, welche die Bildaufnahmequalität verringern. Bei sehr starker Blendung durch tief stehende Sonne können FAS-Funktionen temporär inaktiv sein. Ist eine Kamera hinter einer beweglichen Abdeckung verbaut, welche die Kamera nur bei aktiver Funktion freigibt, besteht die Gefahr, dass bei Ausfall des Klappmechanismus das Kamerasystem ohne Funktion ist.

² Da die Wellenlänge nahe an der des sichtbaren Lichtes liegt, wird diese Strahlung als Nahe-Infrarotstrahlung (NIR) bezeichnet

Zusammenfassung

Für FAS kommt eine Vielzahl verschiedener Sensoren zum Einsatz. Durch deutlich sinkende Preise für Sensoren ist in Zukunft mit einem stark steigendem Verbau von Sensoren und damit verbunden mit zunehmenden FAS-Funktionen zu rechnen. Leistungsfähigkeit und Funktionalität von FAS-Sensoren sind teilweise sehr unterschiedlich. Daraus ergibt sich u. a., dass FAS-Funktionen fahrzeugabhängig sehr unterschiedlich ausgeprägt sein können. Die Funktion von FAS hängt wesentlich von korrekten Sensorinformationen ab. Deren Qualität kann abhängig vom eingesetzten Sensorprinzip durch verschiedenste Störfaktoren negativ beeinflusst werden. Um die Zuverlässigkeit von FAS-Funktionen zu erhalten, müssen im Umgang bspw. bei Reparaturen eine Reihe von fahrzeugspezifischen Regeln eingehalten werden. Wichtig ist in diesem Zusammenhang fachgerechtes justieren und kalibrieren von Fahrerassistenzsystemen gemäß Herstellervorgabe.

Legende FAS

Abkürzung	Gebräuchliche Bezeichnung	Funktion
ACC	Adaptive Cruise Control	Abstandsregelung
AEB	Autonomous Emergency Braking	Notbremssystem
LCA	Lane Change Assist	Spurwechselassistent
LDW	Lane Departure Warning	Spurhalteassistent
PDC	Park Distance Control	Einparkhilfe
TSR	Traffic Sign Recognition	Verkehrszeichenerkennung
AHC	Automatic Headlight Control	Lichtsteuerung
FCW	Forward Collision Warning	Kollisionswarnung
PD	Pedestrian Detection	Fußgängererkennung
RLS	Regen-Lichtsensor	Regen- und Lichterkennung

Literaturverzeichnis

[1] KTI (Hrsg.): Technische Information Nr. 01/15: „Montage von PDC Sensoren in den Stoßfänger“, Stand November 2015, http://www.k-t-i.de/fileadmin/edit/user_upload/2015-01_TI_Montage-PDC-Sensoren.pdf

[2] DENSO: „Driving Assistant System“, Stand November 2015, <http://www.globaldenso.com/en/products/oem/driving-assist-system/>

[3] Winner, H.; h, S.; Wolf, G. (Hrsg.): „Handbuch Fahrerassistenzsysteme“, 2. Auflage 2012, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ISBN 978-3-8348-1457-9

[4] Pfeiffer, F.: „Analyse und Optimierung von Radomen für automobile Radarsensoren“, TU München, Dissertation, 2010

[5] ZKF und AVL (Hrsg.): „Fahrerassistenzsysteme und deren Auswirkung auf die Karosseriewerkstatt“, Informationsbroschüre, 2012

Fabian Bortfeldt M.Sc.

© Jede Art der Vervielfältigung ist nur mit schriftlicher Genehmigung des KTI gestattet.