



1 Einleitung

1.1 Motivation

Der Großteil heutiger Fahrerassistenzsysteme basiert auf der Wahrnehmung der Umgebung eines Fahrzeugs. Zur Unterstützung beim Parken kommen in erster Linie Ultraschallsensoren und Kamerasysteme zum Einsatz. Dabei vermessen ultraschallbasierte Einparkhilfen die Umgebung und geben dem Fahrer akustische oder visuelle Signale über die Abstände zu Hindernissen. Semiautomatische Einparkhilfen übernehmen gar die Querführung des Fahrzeugs, um in eine Parklücke zu rangieren. Der Fahrer muss lediglich das Gas- und Bremspedal betätigen. Kamerabasierte Systeme geben dem Fahrer eine Sicht auf die verdeckte Umgebung. Oft werden zur Unterstützung des Rangierens Hilfslinien in die Darstellung der Kamerabilder eingefügt oder auch mehrere Kamerabilder zu einer gemeinsamen Anzeige fusioniert.

Bei all diesen Systemen bleibt der Fahrer in der Verantwortung und muss jederzeit die Umgebung des Fahrzeugs überwachen. Dies liegt darin begründet, dass die verwendeten Sensoren keine vollständige Abdeckung des Fahrzeugumfelds bieten. Zum einen werden die Fahrzeugflanken nur unzureichend durch Sensoren abgedeckt und zum anderen wird nicht die gesamte Fahrzeughöhe sensorisch abgedeckt, sodass das Fahrzeug blind ist für herausragende Objekte. Es findet keine Vermessung der Höhe von Objekten statt.

Zukünftige Fahrerassistenzsysteme und insbesondere das automatisierte Fahren erhöhen die Anforderungen an die Umfeldwahrnehmung. Assistenzsysteme für das Parken und Rangieren werden in Zukunft stärker in das Fahrgeschehen eingreifen und dem Fahrer zunehmend Aufgaben abnehmen. Automatisierte Fahrsysteme übernehmen die Fahraufgabe sogar vollständig. Da die Verantwortung in derartigen Systemen nicht mehr bei einem Fahrer liegen kann, wird eine vollständige sensorische Absicherung der Umgebung benötigt.



1.2 Heutige Fahrerassistenzsysteme für das Parken und Rangieren

Das Ziel von heutigen Fahrerassistenzsystemen für das Parken und Rangieren besteht darin, den Fahrer in unübersichtlichen Situationen zu unterstützen. Sie kommen dann zum Einsatz, wenn der Fahrer keinen vollständigen Überblick über die Umgebung des Fahrzeugs hat. Im Folgenden werden verschiedene Ausprägungen von Fahrerassistenzsystemen für das Parken und Rangieren vorgestellt, die derzeit in Serienfahrzeugen verbaut werden.

1.2.1 Frühe Parkhilfen

Die ersten Assistenzsysteme zur Unterstützung beim Parken und Rangieren waren sogenannte Peilstäbe und Markierungen an Fahrzeugen. Diese werden als passive Systeme bezeichnet [1] und helfen dem Fahrer, die eigenen Fahrzeugabmessungen in Relation zu den Objekten in der Umgebung besser abzuschätzen. Beispielsweise bot die *S-Klasse* von *Mercedes Benz* ab 1991 einen Peilstab an, der beim Einlegen des Rückwärtsganges automatisch ausfährt. Auch den in den 1960er Jahren üblichen Heckflossen wird die Funktion zugeschrieben, dass sie dem Fahrer einen Überblick über die Proportionen des eigenen Fahrzeugs geben.

1.2.2 Messende Systeme

Messende Systeme zur Parkunterstützung vermessen die Umgebung mittels Sensoren und informieren den Fahrer über die Abstände zu Hindernissen. Die häufigsten Systeme zur Einparkunterstützung basieren auf Ultraschallsensoren [2]. Ultraschallsensoren werden in Kapitel 1.5.1 thematisiert. Abstände zu Hindernissen werden dem Fahrer in der Regel akustisch, zusätzlich oft auch optisch, vermittelt. Als Beispiel ist in Abbildung 1.1 die 8-Segment-Anzeige des *Audi A5* aus dem Baujahr 2007 dargestellt.



Abbildung 1.1: 8-Segment-Anzeige

1.2.3 Rückfahrkamera

Als Rückfahrkamera wird eine am Heck des Fahrzeugs angebrachte Kamera bezeichnet, die den hinteren Bereich des Fahrzeugs erfasst. Das Kamerabild wird dem Fahrer zur Unterstützung beim Parken und Rangieren angezeigt. Aktiviert wird die Anzeige in der Regel durch das Einlegen des Rückwärtsganges. Um dem Fahrer die Orientierung zu erleichtern, wird das Kamerabild gespiegelt wiedergegeben. Da die gesamte Breite des Fahrzeugs dargestellt werden soll, werden Weitwinkelobjektive mit einem großen Öffnungswinkel eingesetzt. Da diese stark verzerrte Aufnahmen liefern, wird dem Fahrer ein nachträglich entzerrtes Bild angezeigt. Im Display können zusätzlich Hilfslinien abgebildet werden, welche dem Fahrer eine Orientierung im Bild ermöglichen. Die Anzeige der Rückfahrkamera eines *Audi A6* aus dem Baujahr 2012 ist in Abbildung 1.2 dargestellt.

1.2.4 Umgebungskameras

Bei dem sogenannten *Surround-View*-System wird ein virtuelles Bild aus den Daten mehrerer Kameras berechnet. Dieses System wird bei Audi *Top View*, bei Nissan *Around View* und bei Volkswagen *Area View* genannt. Kameras mit Weitwinkelobjektiven erfassen das Umfeld des Fahrzeugs und werden zu einer virtuellen Darstellung des Fahrzeugs und der Umgebung aus der Vogelperspektive fusioniert. Für die Berechnung dieses Bildes



Abbildung 1.2: Rückfahrkamera eines *Audi A6*

ist eine genaue Kalibrierung der Kameras notwendig. Die Bildpunkte der einzelnen Kameras werden hierzu bei bekannten optischen Abbildungseigenschaften auf die Bodenebene projiziert und in einem gemeinsamen Bild zusammengefügt. Eine beispielhafte Anzeige des *Top-View*-Systems eines *Audi A8* aus dem Baujahr 2013 zeigt Abbildung 1.3. In diesem System wird das Kamerabild aus vier Weitwinkel-Kameras zusammengefügt, die sich an der Front, am Heck und an den beiden Außenspiegeln befinden.

1.2.5 Semiautomatische Einparksysteme

Semiautomatische Einparksysteme unterstützen den Fahrer durch aktive Lenkeingriffe während des Einparkvorgangs. Zunächst wird beim Vorbeifahren an einer Parklücke der Freiraum vermessen. Dies kann beispielsweise durch Radarsensoren geschehen [3]. Wenn die vermessene Parklücke groß genug ist, um das Fahrzeug hineinzumanövrieren, wird dies dem Fahrer angezeigt. Durch Einlegen des Rückwärtsganges wird das System aktiviert und das Fahrzeug in die Parklücke geführt. Die Umgebung wird während des Parkvorgangs durch Ultraschallsensoren erfasst. Eine Trajektorienplanung berechnet den optimalen Weg, um das Fahrzeug in die Parklücke hineinzumanövrieren. Um der berechneten Trajektorie zu folgen, werden Informationen über die Bewegung des Fahrzeugs berücksichtigt. Während des Einparkvorgangs erhält der Fahrer Anweisungen zum



Abbildung 1.3: *Top-View*-Darstellung eines *Audi A8*

Einlegen des Vorwärts- und Rückwärtsganges sowie zum Gas geben. Das Fahrzeug lenkt selbstständig. Es erfolgt eine automatische Querführung. Dennoch muss der Fahrer weiterhin das Umfeld überwachen und bleibt somit in der Verantwortung. Die eingesetzte Sensorik liefert keine zentimetergenaue Vermessung der Umgebung. Daher muss beim automatischen Rangieren ein Sicherheitsbereich eingehalten werden, sodass die Systeme nicht in enge Parklücken rangieren können, obwohl es durch einen geübten Fahrer möglich wäre. Semiautomatische Systeme befinden sich bei verschiedenen Herstellern als optionale Sonderausstattung im Angebot. Bei dem Modell *Audi Q3* wird das System beispielsweise als *Parkassistent* bezeichnet [3].

1.3 Zukünftige Fahrerassistenzsysteme für das Parken und Rangieren

Die zukünftigen Fahrerassistenzsysteme für das Parken und Rangieren lassen sich unterteilen in Systeme zur Assistenz des Fahrers beim selbstständigen Fahren und in Systeme zum autonomen Fahren.



1.3.1 Park- und Rangierassistentz

Bei Systemen zur Park- und Rangierassistentz wird der Fahrer während seiner Fahraufgabe unterstützt, und die Verantwortung für das Fahren liegt beim Fahrer. Das Fahrzeug kann hierbei allerdings Teilaufgaben übernehmen und so dem Fahrer die Fahraufgabe erleichtern. Beispielsweise bietet es sich an, dass die heutigen semiautomatischen Einparkssysteme derart erweitert werden, dass das Fahrzeug die Längsführung übernimmt, während der Fahrer sich ausschließlich der Überwachung der Umgebung des Fahrzeugs widmet [4]. Eine weitere Ausprägung zukünftiger Assistenzsysteme ist die Verbesserung der Darstellung der Umgebungsinformationen. Das in Abschnitt 1.2.4 vorgestellte *Surround-View*-System zur Anzeige der Fahrzeugumgebung leidet unter fehlenden Höheninformationen, sodass Objekte, welche die Fahrbahn überragen, verzerrt dargestellt werden. Im Beispiel aus Abbildung 1.3 kann beobachtet werden, dass das benachbarte Fahrzeug stark verzerrt wird. Durch eine genauere Umgebungswahrnehmung im dreidimensionalen Bereich können Ansichten generiert werden, die realistischere Darstellungen ermöglichen. Eine Verbesserung der Umfeldwahrnehmung kann zudem zu genaueren Abstandswarnsystemen führen. Auch sind Systeme denkbar, die automatisch auf Hindernisse durch Notbremsungen reagieren. Notwendig für solche Systeme ist eine umfassendere Umfeldwahrnehmung, die den Nahbereich des Fahrzeugs in einer hohen Genauigkeit vermessen kann.

1.3.2 Automatisches Parken und Rangieren

Bei automatischen Parksystemen fährt das Fahrzeug selbstständig in die Parklücke. Beispiele hierfür sind die von der *Audi AG* vorgestellten prototypischen Systeme *Audi Parkpilot* und *Audi Garagenpilot* [5]. Bei diesen Systemen muss sich der Fahrer nicht mehr im Fahrzeug befinden und überwacht die Fahrzeugumgebung von außerhalb. Er kann das System jederzeit bei Gefahr unterbrechen. Durch die visuelle Überwachung kann die Verantwortung weiterhin beim Fahrer bleiben. Auch *Volkswagen* [6], *BMW* [7],[8] und *Renault* [9] forschen an ähnlichen Systemen zum automatischen Einparken.

Für vollständig autonome Parksysteme muss eine vollständige Absicherung der Fahrzeugumgebung gewährleistet werden. Um dies zu ermög-



lichen, ist eine vollständige sensorische Erfassung des Fahrzeugumfelds notwendig. Erst dann kann die Verantwortung für den Einparkvorgang vom Fahrzeug übernommen werden. Auf diese Weise könnte der Fahrer auch in unübersichtlichen Rangiersituationen jederzeit die Kontrolle an das Fahrzeug übergeben.

1.4 Anforderungen an die Umfeldwahrnehmung

Im vorhergehenden Abschnitt 1.3 wurden Perspektiven zukünftiger Fahrerassistenzsysteme für das Parken und Rangieren vorgestellt. Aus diesen Systemen ergeben sich neue Anforderungen an die Umfeldwahrnehmung, die nachfolgend aufgelistet werden.

360°-Abdeckung

Insbesondere autonome Fahrfunktionen benötigen eine vollständige Absicherung der Fahrzeugumgebung. Das Fahrzeug muss das Umfeld über den gesamten Fahrzeugumfang kennen. Hierzu wird eine lückenlose sensorische Abdeckung benötigt. Insbesondere muss eine sensorische Abdeckung auch in vertikaler Richtung gegeben sein.

Reichweite

Für Park- und Rangierfunktionen werden im Vergleich zu anderen Fahrerassistenzsystemen nur geringe Reichweiten für die sensorische Erfassung benötigt. Beim Parken bewegt sich das Fahrzeug in einer niedrigen Geschwindigkeit. Dennoch muss eine Reaktion auf Objekte möglich sein. Daher wird eine sensorische Erfassung mit einer Reichweite von etwa 3 m benötigt. Die Reichweite der Sensorik kann im Seitenbereich geringer sein.

Robustheit gegenüber Störeffekten

Die Sensorik eines Fahrzeugs muss auch unter verschiedenen Witterungsbedingungen ausreichend genau messen. Aufgrund der notwendigen Abdeckung in alle Richtungen muss die Sensorik auch bei Dunkelheit funktionie-



1 Einleitung

ren, da im Regelfall nur der Bereich vor dem Fahrzeug durch Scheinwerfer beleuchtet wird.

Absolute Messgenauigkeit

Für zentimetergenaues Rangieren wird eine entsprechende Genauigkeit der Abstandssensorik benötigt. Die notwendige Genauigkeit hängt von der Distanz eines Hindernisses zum Fahrzeug ab. In unmittelbarer Nähe zum Fahrzeug soll die Genauigkeit wenige Zentimeter betragen.

Hochgenaue 3D-Umfeldmodellierung

Die Daten der Sensorik sollen eine hochgenaue 3D-Umfeldmodellierung ermöglichen. Eine dreidimensionale Modellierung wird insbesondere für die nächste Generation der in Kapitel 1.2.4 präsentierten *Surround-View-Systeme* benötigt. Auch für die Messung von Über- und Unterfahrbarkeit von Objekten wird eine hochgenaue 3D-Modellierung benötigt.

Verbesserung der Lokalisierung durch Sensordaten

Die Fahrzeugodometrie auf Basis von Raddrehzahl und Lenkwinkelsensoren liefert bei niedriger Geschwindigkeit und hohen Lenkwinkelschlägen nur eine unzureichende Genauigkeit. Derartige Szenarien sind allerdings vor allem bei Einpark- und Rangiervorgängen relevant. Daher soll eine genauere Lokalisierung ermöglicht werden, indem die Sensordaten der eingesetzten Sensorik berücksichtigt werden. Für eine hochgenaue Umfeldmodellierung wird eine ebenso hochgenaue Lokalisierung benötigt. Nur so kann bei der Erstellung des Umfeldmodells eine korrekte Datenakkumulation während einer Bewegung des Fahrzeugs ermöglicht werden. Anhand der Sensordaten soll eine Bewegungsschätzung erfolgen, welche bei Bedarf mit der vorhandenen Fahrzeugodometrie fusioniert werden kann.

Erkennung dynamischer Objekte

Dynamische Objekte sollten nicht in die 3D-Modellierung der statischen Umgebung einfließen. Sie müssen daher erkannt und von der Modellierung des statischen Umfeldmodells ausgeschlossen werden. Dennoch ist es



1.5 Sensormessprinzipien zur Umfeldwahrnehmung

wichtig, dass dynamische Objekte verfolgt werden, um auf mobile Hindernisse reagieren zu können. Beispielsweise sollte ein autonomes Fahrzeug einen Sicherheitsabstand zu Fußgängern halten, während es an statischen Hindernissen wie einem parkenden Fahrzeug bis auf wenige Zentimeter vorbeifahren kann.

Bestimmung der Abstände zu Hindernissen

Die Abstände zu Hindernissen in der Umgebung sollten aus einem Umfeldmodell extrahiert werden können. Durch die Extraktion von Abstandsinformationen können dem Fahrer Informationen gegeben werden oder in einem automatischen Fahrsystem passende Trajektorien berechnet werden.

Hohe Messrate

Ein autonomes Fahrzeug muss auf Hindernisse in der Umgebung reagieren. Dies muss auch in einer dynamischen Umgebung möglich sein. Wenn sich die Umwelt verändert, dann verändert sich das vom Fahrzeug berechnete Umgebungsmodell erst durch neue Messungen der Sensoren. Daher benötigen die Sensoren eine genügend hohe Messrate, um auch Veränderungen in der Umgebung rechtzeitig zu erfassen.

Messung auch im Stand möglich

In enge Parklücken geparkte Fahrzeug haben oft kurze Abstände zu benachbarten Fahrzeugen und anderen Hindernissen. Ein System zur Unterstützung beim Ausparken benötigt auch im Stand ohne erfolgter Fahrzeugbewegung Kenntnis über die Umgebung. Daher muss die in solchen Systemen eingesetzte Sensorik die Fähigkeit besitzen auch im Stand messen zu können.

1.5 Sensormessprinzipien zur Umfeldwahrnehmung

Im Folgenden werden verschiedene Sensormessprinzipien vorgestellt, die für die Umfeldwahrnehmung von Automobilen eingesetzt werden, um Fahrerassistenzsystemen zu realisieren.



1.5.1 Ultraschallsensoren

Ultraschallsensoren bilden die Grundlage für die heutigen Einparkhilfen [2]. Üblicherweise werden sie in die hinteren und vorderen Stoßfänger integriert, um die Abstände zu Hindernissen zu bestimmen. Bei der Nutzung mehrerer Sensoren ergibt sich ein großer Erfassungswinkel, der die gesamte Fahrzeugbreite umfasst. Das Messprinzip basiert auf der Aussendung eines Ultraschallimpulses und der Auswertung des durch eine Reflexion entstandenen Echos. Im Automobilbereich sind Schallfrequenzen zwischen 40 und 50 kHz üblich [10]. Der Sensor detektiert das Zeitintervall zwischen Aussendung und Empfang eines Signals. Der Abstand zum Hindernis ergibt sich aus der Laufzeit des Signals. Ultranahbereichssensoren in der Ultraschalltechnik besitzen eine Reichweite von etwa 2,5 m [10]. Ohne Weiteres kann die Richtung des reflektierten Echos und damit die Position eines Hindernisses nicht bestimmt werden. Dieses Problem kann allerdings durch die Verwendung von mehreren Sensoren und einer Auswertung des sogenannten Kreuzechos behoben werden. Hierzu fungiert ein Sensor zugleich als Sender und Empfänger und ein weiterer Sensor ausschließlich als Empfänger des ausgesendeten Signals [1]. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 1.4 dargestellt. Beide Sensoren bestimmen nun die gegebenenfalls unterschiedlichen Distanzen d_1 und d_2 . Die Position der Reflexion und damit der reale Abstand zum Stoßfänger d_r kann anschließend durch Triangulation bestimmt werden.

Die Sende- und Empfangseinheit muss nach der Aussendung eines Signals zunächst zur Ruhe kommen, bevor eine Reflexion empfangen werden kann. Aus diesem Grund können reflektierte Signale unterhalb eines gewissen Mindestabstandes nicht gemessen werden.

1.5.2 Radar-Systeme

Radar-Sensoren werden in erster Linie für Abstandsregeltempomaten und für Systeme zur Kollisionswarnung eingesetzt [2]. Eine elektromagnetische Welle wird über eine oder mehrere Antennen abgestrahlt. Diese wird an Objekten reflektiert und gelangt über eine oder mehrere Empfangsantennen zurück zum Sensor. Durch die Auswertung des Empfangssignals können Distanz und Geschwindigkeit des reflektierenden Objektes sowie

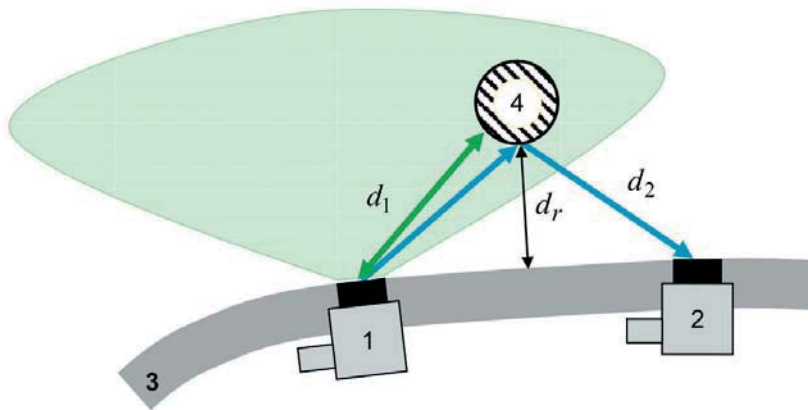


Abbildung 1.4: Abstandsmessung durch Auswertung des Kreuzechos [1]. Sensor 1 fungiert als Sender und Empfänger während Sensor 2 ausschließlich Signale empfängt. Durch Triangulation kann die Distanz. Beide Sensoren bestimmen gegebenenfalls unterschiedliche Distanzen d_1 und d_2 . Der Abstand d_r kann anschließend durch Triangulation bestimmt werden.

der Winkel, unter dem die Reflexion detektiert wurde, ermittelt werden [11].

Im Automobilbereich werden die Frequenzbereiche 24-24,25 GHz und 76-77 GHz verwendet [1]. Zur Bestimmung der Distanz kommen verschiedenen Verfahren zum Einsatz. Beim Pulsradar werden kurze Wellenpakete gesendet und ähnlich wie beim Ultraschallverfahren die Signallaufzeit gemessen. Beim Dauerstrichradar hingegen wird ein kontinuierliches Signal mit wechselnder Frequenz ausgesendet. Aus dem Vergleich des Empfangssignals mit dem Sendesignal kann auf die Distanz der Reflexion geschlossen werden. Objektgeschwindigkeiten können durch die Berücksichtigung des Dopplereffekts bestimmt werden. Um die Richtung, aus der das Signal reflektiert wurde, zu bestimmen, existieren verschiedene Verfahren. Eine Möglichkeit ist das sogenannte *Scanning*. Hier wird ein Signal mechanisch in verschiedene Richtungen gelenkt, um einen größeren Winkelbereich abzudecken. Die Amplitude des reflektierten Signals ist dann am höchsten, wenn genau in die Richtung des Objekts gestrahlt wird. Eine weitere Möglichkeit ist die parallele Aussendung und der parallele Empfang mehrerer Radarkeulen. Eine Auswertung des Verhältnisses der Amplituden lässt anschließend auf den Sichtwinkel schließen.



1 Einleitung

Moderne Radarsensoren können mehrere Ziele gleichzeitig erfassen. Im Automobil eingesetzte Sensoren bieten üblicherweise Reichweiten von bis zu 250 m [2].

1.5.3 Lidar

Lidar (*Light Detection and Ranging*) ist ein optisches Messverfahren zur Distanzbestimmung von Objekten. Im Automobilbereich werden in der Regel Laserpulse im nicht sichtbaren Infrarotbereich in die Umgebung abgestrahlt [2]. Ein Teil des abgestrahlten Lichts wird von Objekten reflektiert, gelangt zurück zum Sensor und wird von einer Fotodiode empfangen. Durch die Messung der Lichtlaufzeit kann anschließend auf die Distanz des Objektes geschlossen werden. Der Lichtstrahl ist in der Regel stark gebündelt, um eine hohe Leuchtdichte und damit eine hohe Reichweite zu erhalten. Um nun mehrere Punkte in der Umgebung zu vermessen, muss der Lichtstrahl in verschiedene Richtungen gelenkt werden. Dies kann beispielsweise durch einen rotierenden Spiegel herbeigeführt werden. Hierbei werden Winkelauflösungen von bis zu acht Messpunkten pro Grad erreicht [12]. Die Distanzgenauigkeit von Laserscannern liegt im Zentimeterbereich. Störeffekte treten allerdings bei Nebel und Gischt auf, da das Infrarotlicht auch von Wasserpartikeln in der Luft reflektiert wird.

1.5.4 Mono-Kamera

Kamerasysteme werden zunehmend in Fahrzeugen eingesetzt. Am meisten verbreitet sind hierbei zum einen die vorausschauenden Kameras, welche üblicherweise hinter der Windschutzscheibe angebracht werden. Sie erfüllen verschiedene Funktionen wie Verkehrszeichenerkennung [13], Spurerkennung [14] oder Fußgängerdetektion [15]. Zum anderen werden auch Umfeldkameras mit Weitwinkelobjektiven eingesetzt. Als Anwendung stehen hierzu die in Kapitel 1.2.3 genannten Rückfahrkameras und die in Kapitel 1.2.4 vorgestellten *Surround-View*-Systeme im Vordergrund. Während Kamerasysteme in verschiedensten Anwendungen eingesetzt werden, ist der grundlegende Aufbau aller Kameras ähnlich. Der Kern einer Kamera ist der Sensorchip. Im Automobilbereich werden in erster Linie CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) Sensoren eingesetzt



[16]. Der Sensorchip ist eine Matrix aus fotoempfindlichen, integrierten Schaltungen, sogenannten Pixeln. Vor dem Sensor befindet sich eine Optik. Diese hat die Aufgabe, das zur Kamera kommende Licht zu bündeln und projiziert die dreidimensionale Umgebung auf den zweidimensionalen Sensor. Auf diese Weise erhält man eine digitalisierte zweidimensionale Projektion der Umgebungshelligkeiten.

Neben einer Anzeige der Bilddaten für den Fahrer können die Bilddaten auch für unterschiedlichste Anwendungen weiterverarbeitet werden. Eine Merkmalsextraktion bietet in der Regel die Grundlage für eine Detektion und Klassifikation von Objekten wie Verkehrszeichen oder Fußgängern [2]. Durch Bildverarbeitungsverfahren ist es auch möglich, dreidimensionale Informationen aus bewegten Kamerabildern zu erzeugen. Sogenannte *Structure-from-Motion*-Verfahren (SfM) schätzen dreidimensionale Strukturen anhand von zweidimensionalen Bildfolgen, welche von unterschiedlichen Positionen aufgenommen sind [17]. Bildverarbeitungsverfahren sind aufgrund der Menge der Informationen sehr rechenaufwendig. Die zugehörigen Steuergeräte wenden oft die höchste Rechenleistung im Fahrzeug auf [2].

1.5.5 Stereo-Kamera

Das Funktionsprinzip von Stereo-Kamerasystemen ähnelt dem Prinzip des menschlichen Sehens. Eine räumliche Tiefenwahrnehmung entsteht durch die Fusion zweier Bilder. Ein Stereo-Kamerasystem besteht daher aus zwei Kameras, die einen festen Abstand zueinander besitzen.

Tiefenwerte werden durch eine nachgelagerte Bildverarbeitung von synchron aufgenommenen Bildern berechnet. Diese lassen sich aus der Distanz zwischen den Bildkoordinaten eines Punktes in einem Kamerabild und seinem korrespondierenden Punkt im zweiten Kamerabild bestimmen. Die Distanz zwischen den korrespondierenden Punkten wird Disparität genannt [18]. Um die Tiefenwerte zu bestimmen, müssen die Kameras kalibriert sein. Dies bedeutet insbesondere, dass die Positionen und Ausrichtungen (Translation und Rotation) der Kameras zueinander bekannt sein müssen. Um die Disparität zwischen den beiden Kamerabildern zu berechnen, müssen korrespondierende Punkte zwischen den Bildern gesucht werden. Hierbei kann ausgenutzt werden, dass der korrespondierende Punkt eines Bildpunktes im ersten Kamerabild auf einer Linie im zweiten



1 Einleitung

Kamerabild liegen muss. Durch eine sogenannte Rektifizierung der Kamerabilder reduziert sich die Suche zusätzlich auf eine horizontale Linie.

Tiefeninformationen können nur für den sich überlappenden Sichtbereich beider Kameras bestimmt werden. Zudem lassen sich mit dem Stereo-Verfahren keine sehr großen Öffnungswinkel realisieren. Weitere Nachteile sind die Notwendigkeit einer starren Montage und der große benötigte Bauraum durch den Einsatz von zwei versetzten Kameras.

Eingesetzt werden Stereo-Kameras in erster Linie für vorausschauende Sicherheits- und Komfortfunktionen. Zusätzlich zu den Funktionen, welche sich mit Mono-Kameras realisieren lassen, bieten Stereo-Kameras erweiterte Möglichkeiten zum vorausschauenden Fußgängerschutz [19], zur Kollisionsvermeidung [20] und zur Vermessung der Fahrbahnoberfläche [21].

1.5.6 Time-of-Flight-Kamera

Time-of-Flight-Kameras sind aktive 3D-Kameras, die auf dem Prinzip der Lichtlaufzeitmessung basieren. Eine aktive Lichtquelle strahlt modulierte Licht in die Umgebung ab. Dieses Licht wird an Objekten reflektiert und gelangt über eine Optik auf den Bildsensor der Kamera. Jedes Pixel auf dem Sensor ist eine integrierte Schaltung zur Auswertung des reflektierten Lichtsignals. Um die Distanz zu bestimmen, existieren verschiedene Verfahren.

Bei der Messung der Phasenverschiebung wird Infrarotlicht in einem Rechteck- oder Sinussignal moduliert. Ein Pixel des Sensors bestimmt in diesem Fall die Phasenverschiebung zwischen dem ausgehenden und einfallenden Signal. Aus der Phasenverschiebung kann dann auf die Lichtlaufzeit und damit auf den vom Licht zurückgelegten Weg geschlossen werden. Die Lichtlaufzeit wird daher nicht im eigentlichen Sinne gemessen, sondern durch die Messung der Phasendifferenz bestimmt. Eine Ausprägung derartiger Time-of-Flight-Kameras ist das *Photonic Mixing Device* (PMD). PMD-Kameras basieren auf der Messung der Phasendifferenz und werden ausführlich im nachfolgenden Kapitel 2.1 vorgestellt.

Des Weiteren existieren Time-of-Flight-Kameras, welche direkt auf dem Prinzip der Messung der Lichtlaufzeit basieren. Das Messverfahren ist analog zu den lichtlaufzeitmessenden Lidar-Sensoren, die in Kapitel 1.5.3 behandelt wurden. Allerdings wird die zu vermessende Umgebung nicht

durch Ablenkung eines fokussierten Lichtstrahls abgetastet. Stattdessen wird der gesamte zu vermessende Bereich mit Lichtpulsen bestrahlt. Jedes Pixel des Sensors bestimmt nun unabhängig und zeitgleich eine dem Raumwinkel des Pixels entsprechende Distanz. Kameras dieser Art werden auch *Flash Lidar* genannt [22].

Eine weitere Art von Time-of-Flight-Kameras arbeitet nach dem *Global-Shutter*-Prinzip. Hierbei sendet die Kamera Lichtpulse in die Umgebung aus. Ein *Shutter* befindet sich vor dem Sensor und schützt den Sensor bei Verschluss vor ungewolltem Lichteinfall. Dieser *Shutter* wird nun mit dem Lichtsignal synchronisiert und öffnet nur, wenn Lichtpulse ausgesendet werden. Da das Licht eine gewisse Zeit benötigt bis es zurück zum Sensor gelangt, fällt nur ein Teil des abgestrahlten Lichts auf den Sensor. Die Länge des Zeitraums, in dem das reflektierte Licht empfangen wird, ist dabei proportional zum zurückgelegten Weg des Lichtes. Ein Beispiel einer solchen Kamera ist die *ZCam* der Firma *3DV* [23].

Time-of-Flight-Kameras können im Automobil für die vorausschauende Sicherheit verwendet werden. Hierzu werden in erster Linie PMD-Kameras eingesetzt, welche Funktionen wie den vorausschauenden Fußgängerschutz [24],[25], automatische Notbremsfunktionen [26] oder *PreCrash*-Systeme [27] ermöglichen.

1.6 Vergleich der Sensoren

In vorhergehenden Kapitel 1.5 wurden verschiedene Sensoren zur Umfeldwahrnehmung vorgestellt. Die Anforderungen der zukünftigen Fahrerassistenzsysteme an die Umfeldsensorik wurden in Abschnitt 1.4 erläutert. Im Folgenden werden die unterschiedlichen Sensoren bezüglich der Anforderungen miteinander verglichen. Abbildung 1.1 fasst den Vergleich tabellarisch zusammen.

Ultraschallsensoren, welche in Kapitel 1.5.1 vorgestellt wurden, bieten keine Möglichkeit für eine 3D-Datenverarbeitung. Somit ist auch keine Messung von Über- und Unterfahrbarkeit möglich. Auch können keine dynamischen Objekte erkannt werden. Zudem bieten sie die niedrigste Reichweite im Vergleich.

Mono-Kamerasysteme können, wie in Kapitel 1.5.4 beschrieben, 3D-Informationen durch eine nachgelagerte Bildverarbeitung liefern. Durch Weit-