

Studentisches Kolloquium

Thema:

DE102011083745A1 -

Verfahren zum monokularen Motion Stereo-basierten automatischen Vermessen von freien Parkplätzen

Modulbezeichnung: M445 – Angewandte Nutzfahrzeugtechnik

Modulverantwortlicher: Prof. Dr.-Ing. Martin Wittmer

Fachlicher Betreuer: Prof. Dr. rer. nat. Toralf Trautmann

eingereicht von: Darius Schwarze

Abgabedatum: 01.05.2023

Matrikelnummer: 49198

Seminargruppe: 20/052/03

Inhalt

Abkürzungsverzeichnis	II
Verzeichnis der Formelzeichen und Symbole	III
Abbildungsverzeichnis	IV
1 Einleitung.....	5
2 Erklärung grundlegender Begriffe	6
3 Ähnliche Erfindungen	8
4 Vergleich mit anderen Vermessungsmethoden	11
5 Inhalt des Patents DE102011083745A1	12
5.1 Funktionsweise der Erfindung	12
5.2 Vorgehensweise der Verarbeitungssoftware	16
5.3 Anforderungen an die Hardware	20
5.4 Diskussion des Patents.....	21
6 Anwendungsbeispiele.....	24
7 Zusammenfassung.....	28
Literatur und Quellenverzeichnis	29
Eidesstattliche Erklärung.....	31

Abkürzungsverzeichnis

ADAC	Allgemeine Deutsche Automobil-Club
BMW	Bayerische Motoren Werke
Lidar	Light detection and ranging
Radar	Radio detection and ranging
SAD	sum of absolute differences
PMD	Photomischdetektor

Verzeichnis der Formelzeichen und Symbole

Zeichen	Einheit	Bedeutung
d	M	Deviation/Disparität
f	Hz	Frequenz
P	%	Wahrscheinlichkeit
s	m	Weg
T	m	Stereobasis
t	s	Zeit
v	m/s	Geschwindigkeit

Abbildungsverzeichnis

2.1	Prinzip der Triangulation.....	6
5.1	Programmablaufplan des Patents.....	13
5.2	Zurücksetzen der Sensorchips am Ende des Belichtungsfensters.....	14
5.3	Zurücksetzen der Sensorchips nach jeder Zwischenauslesung.....	15
5.4	Ablaufschema der Bildverarbeitung	16
5.5	Ergebnis der Segmentation.....	18
5.6	Ermittlung der Tiefenwerte einer Parkfläche.....	19
5.7	Verteilung der Messfehler.....	24
6.1	Sichtbereiche der von Tesla verbauten Kameras.....	26

1 Einleitung

Der Vorgang des Einparkens zählt bei Amateuren sowie erfahrenen Autofahrer/-innen zu den unbeliebtesten Aufgaben. Das liegt zum einen daran, dass sich die Parksituation in den Städten weltweit zunehmend verschlechtert, was auf die fortschreitende Bebauung der Innenstädte und Randbezirke eines Stadtraums zurückzuführen ist. Außerdem steigt neben der Einwohnerzahl auch der Pendler- und der Lieferverkehr, sodass öffentliche Parkmöglichkeiten weitestgehend ausgeschöpft werden. Der andere Grund, warum das Einparken oft mit negativen Emotionen verbunden ist, ist der psychische Druck, der im hektischen Straßenverkehr auf einen/eine parkplatzsuchende/-n Autofahrer/-in wirkt. Diese Person verfolgt deshalb das Ziel, möglichst schnell eine freie und genügend große Parklücke zu entdecken, um das Fahrzeug darin zügig abzustellen. Aus dieser Motivation heraus wünschen sich viele Verkehrsteilnehmende Hilfe bei dieser alltäglichen Aufgabe. Die Nürnberger Infas quo GmbH fand heraus, dass sich die Mehrheit der Autofahrer/-innen, digitale Unterstützungen beim Parken vorstellen können ([1] Meyer 2022). Hinzu kommt, dass die Parkplatzsuche in den meisten Fällen sechs bis neun Minuten dauert, was für zunehmenden Stress sorgt. Daher entwickeln Ingenieure und Ingenieurinnen bereits seit den 1990er Jahren automatisierte Systeme, die den Einparkvorgang erleichtern sollen. Aufgrund der hohen Robustheit haben sich Ultraschallsensoren für die Parkplatzvermessung durchgesetzt. Aus der begrenzten Reichweite und den im Vergleich zu einer einfachen passiven Kamera hohen Kosten reichweitenoptimierter Ultraschallmesseinrichtung entwickelten Dr. Eric Wahl und Christian Unger im Jahr 2011 ein Verfahren, um mit einer kostengünstigen Seitenkamera freie Parkflächen zu vermessen ([2] Wahl und Unger 2013, S.1 ff).

2 Erklärung grundlegender Begriffe

Im Folgenden werden die wichtigsten Begriffe erklärt, die für das Verständnis des monokularen Motion Stereo-basierten automatischen Vermessens freier Parkplätze benötigt werden.

Die sogenannte Deviation, auch als **Disparität** bekannt, ist die horizontale Abweichung der Position eines Punktes, der auf zwei Bildern zu sehen ist. Die scheinbare Bewegung dieses Referenzpunktes zwischen den Abbildungen ist entweder auf die Bewegung des Gegenstandes oder auf die des Beobachters beziehungsweise der Kamera zurückzuführen. Werden Bilder auf mehrere, eindeutig identifizierbare Punkte untersucht, kann an einem zweiten Bild die Disparität aller wiedererkennbaren Punkte ermittelt werden. Diese können bildlich in einer Disparitätskarte dargestellt werden. ([2] Wahl und Unger 2013, S.1 ff)

Um eine dreidimensionale Ansicht aus dieser Disparitätskarte zu gewinnen, ist die Verwendung der **Triangulation** unabdingbar. Es werden von zwei unterschiedlichen Positionen jeweils ein Bild eines Punktes aufgenommen (Abb.2.1). Dieser Objektpunkt ist in beiden Bildern eindeutig identifizierbar. Um die Entfernung dieses Objekts von der Kamera zu ermitteln, wird die Höhenlinie Z im aufgespannten Dreieck berechnet. Es ist die Brennweite f des Objektivs bekannt. Des Weiteren ist der Abstand T der beiden Kameras zueinander gegeben. In Abbildung 2.1 ist diese Strecke mit der Beschriftung „stereo baseline“ gekennzeichnet. Sie kann als Grundlinie des betrachteten Dreiecks angenommen werden. Wird schließlich die Disparität d ermittelt, ist das dargestellte Dreieck eindeutig definiert. Schließlich kann die Entfernung des Objekts von der Stereo-Basislinie mit

$$Z = \frac{T * f}{d}$$

berechnet werden.

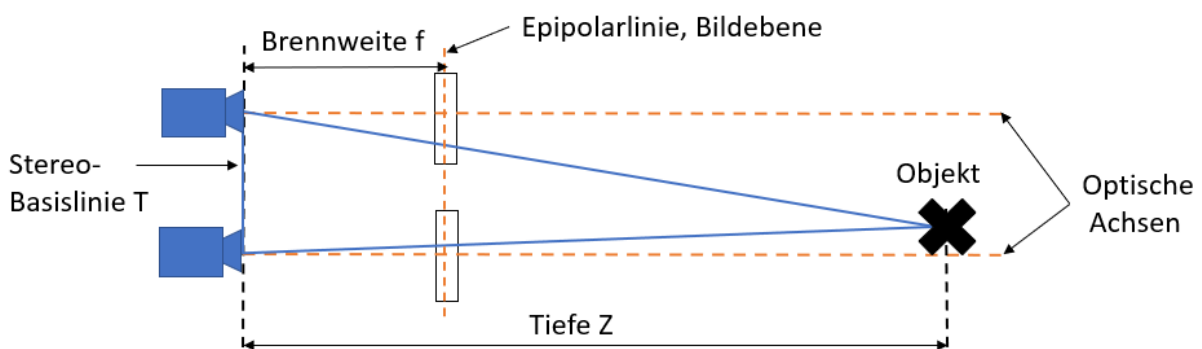


Abbildung 2.1: Prinzip der Triangulation (Quelle: [3] nach Tiziani o.J., S.5 f).

Für eine exakte Tiefenmessung sollte die Entfernung des Punktes von den Kameras höher sein als der Abstand der beiden Kameras zueinander. Um die Entfernung möglichst genau bestimmen zu können, ist es hilfreich, wenn die Kameras in einem Abstand von mindestens zehn Zentimeter angeordnet sind. Außerdem ist anzunehmen, dass die optischen Achsen, die senkrecht auf den lichtsensiblen Flächen stehen, in einer Ebene angeordnet sind (optische Achsen, Abb.2.1), damit ein windschiefer Verlauf der Projektionsgeraden (blau) vermieden wird. Für die Ermittlung einer dreidimensionalen Struktur kann neben der Verwendung eines Kamerapaars, was als binokulares Sehen bezeichnet wird, eine monokulare Kamera verwendet werden. Dadurch kann eine Kamera eingespart werden. Allerdings ist eine exakte Justierung der Kamerahalterung erforderlich, da kleine Winkelabweichungen zu großen Fehlern in der Tiefenberechnung führen. Das Patent, was im nächsten Gliederungspunkt erläutert wird, nutzt ebenfalls nur eine Kamera. Um zu verdeutlichen, dass es sich um genau eine Kamera mit einem Objektiv handelt, wurde der Begriff **Monokamera** eingeführt. Das neuartige Verfahren benötigt jedoch keine definierte Kamerabewegung, um eine dreidimensionale Abbildung der Umgebung zu erzeugen. Stattdessen behält die Kamera ihre Ausrichtung bei. Mithilfe der vorherigen Berechnung von Disparitäten und der Fahrzeugodometrie kann trotz der starren monokularen Kamera die Triangulation durchgeführt werden ([3] Tiziani o.J., S.5 f). Unter der **Odometrie** wird ein Verfahren verstanden, welches für die Bewegungs- und Positionsschätzung verwendet wird. In der Fahrzeugtechnik greift diese Methode auf die Daten der Raddrehzahl- und Gierratensensoren zu. Neben vielen weiteren Bewegungsparametern wird beispielsweise der Lenkwinkel in die Lageschätzung einbezogen. ([4] Ma et al 2020, S. 13)

Im Patent wird die Umgebung durch ein **passiv bildgebendes** Verfahren abgebildet. Das bedeutet, dass die Kamera ohne eigene Lichtquelle Bilder mithilfe von lichtsensiblen Sensoren aufnehmen kann. Diese Bilder werden in dreidimensionale Abbildungen umgewandelt. Anschließend erfolgt in der Regel eine Unterteilung in kleine Volumenblöcke. Jeder Block wird in weitere kleine Quader unterteilt. Oftmals erfolgt die Unterteilung in jeweils acht Volumenelemente. Diese werden dem übergeordneten, großen Block zugeordnet. Um diese Hierarchie übersichtlich zu gestalten, wird ein sogenanntes **Octree** eingesetzt. Mithilfe dieser Baumstruktur können jedem Volumenelement acht kleine Würfel zugeordnet werden. Je nach Auflösung kann dieser Prozess theoretisch unendlich weitergeführt werden. ([5] Burger und Burge 2015, S.357)

Dank der Unterteilung der Umgebungsdarstellung in kleine Teilbereiche können Bilder anschließend besser miteinander verglichen werden. Dazu werden Abweichungen entsprechender Bildelemente detektiert. Mithilfe der „**sum of absolute differences**“ -Methode

(SAD) wird ein positiver Zahlenwert ermittelt, der umso größer ist, je mehr Unterschiede die zwei verglichenen digitalen Bilder aufweisen. ([6] Niitsuma und T.Maruyama 2010, S. 168 f)

Unter dem Begriff „**Rauschen**“ werden Störungen zusammengefasst, die die Bildqualität verschlechtern. Diese sind unabhängig vom Bildsignal. ([5] Burger und Burge 2015, S.441)

3 Ähnliche Erfindungen

In den nachfolgenden Ausführungen werden Patente kurz dargestellt, die dem Patent DE102011083745A1 für das Verfahren zum monokularen Motion Stereo-basierten automatischen Vermessen von freien Parkplätzen ähneln. Diese wurden den Entgegenhaltungen der genannten Patentschrift entnommen. Die neuartige Erfindung ist aus diesen Ideen hervorgegangen beziehungsweise konkurriert mit diesen.

Die DaimlerChrysler AG entwickelte bereits 2002 ein Verfahren und eine Vorrichtung zur videobasierten Beobachtung und Vermessung der seitlichen Fahrzeugumgebung. Die Neuerungen wurden im Patent DE 000010244148 A1 im Jahr 2004 veröffentlicht. Wegen des „Kompromisses zwischen Auflösung der Abtastung und Größe des erfassten Bereichs“ ([7] Bräunl et al 2002, S.2) wurde eine Vorgehensweise entwickelt, mit der die Möglichkeit besteht, eine bereits verbaute Monokamera zu nutzen. Sie kann in einem Winkel zwischen 45° und 135° zur Fahrtrichtung eingestellt sein. Die aufgenommenen digitalen Bilder werden schließlich mit einem Zeitstempel versehen und abgespeichert. Die Fahrzeugbewegung wird in der Regel über die Raddrehzahlsensoren ermittelt. Damit die Momentaufnahmen zuverlässig verarbeitet werden konnten, muss die Bildaufnahme nach äquivalenten Abständen erfolgen. Für höhere Geschwindigkeiten bedeutete dies eine höhere Bildrate. Die zwischen zwei Momentaufnahmen zurückgelegte Wegstrecke wird als Stereobasis beziehungsweise Stereobasislinie bezeichnet und sollte idealerweise zwischen $s_{\min} = 0,2 \text{ m}$ und $s_{\max} = 1,0 \text{ m}$ liegen. Des Weiteren wird nur Bildmaterial verwendet, bei welchem sich die Kameraeinstellung nicht oder kaum verändert hat. Die gewünschte dreidimensionale Abbildung des seitlichen Umfelds wird durch die Überlagerung von Einzelbildern realisiert. Dazu werden anhand von festen Ortspunkten die lokalen Tiefeninformationen addiert. Das Ergebnis ist eine globale Tiefenansicht, die in Fahrtrichtung ständig mit den neuen Bildaufnahmen erweitert wird. Durch den Einsatz von Filtern kann der Effekt des Rauschens bei der Überlagerung zum globalen dreidimensionalen Abbild minimiert werden. Daraufhin unterteilt die Software die erhaltene Umgebungsdarstellung in einheitliche vordefinierte würfelförmige Volumenelemente. Diesen werden den gemessenen lokalen Tiefeninformationen zugeordnet und in eine verzweigte Datenstruktur eingeordnet.

In der Baumstruktur, die in den meisten Fällen als Octree ausgeführt wird, erfolgt schließlich die Abspeicherung der Volumenblöcke entsprechend einer zuvor ermittelten Hierarchie. Darüber hinaus schlugen die Erfinder Bräunl und Franke vor, die lokalen Bilddaten für jeden Ortspunkt zu gewichten. Anhand eines aus dem Gesamtgewicht und einem Tuningfaktor abgeleiteten Schwellwertes, wird entschieden, welche Bildbereiche in die nachfolgende Informationsverarbeitung einbezogen werden. Der Tuningfaktor hat dabei die Aufgabe, die Bildauflösung festzulegen und damit den Rechenaufwand zu begrenzen. ([7] Bräunl et al. 2002, S.2 ff)

Die beschriebene Anwendung kann neben der Vermessung eines Parkplatzes für die Gefährdungserkennung eingesetzt werden. Diese Funktion beschränkt sich allerdings auf den Bereich, der von der seitlichen Kamera im Winkel von 45 bis 135° zur Fahrtrichtung wahrgenommen werden kann. Bei der Verwendung einer seitlichen Monokamera entsteht das Problem, dass nur ein kleiner Messbereich abgedeckt werden kann. Die Realisierung eines Totwinkelassistenten wäre demnach nur unter einer speziellen Kameraeinstellung möglich. Ein weiterer Nachteil wird deutlich, wenn das Fahrzeug auf unebener Fahrbahn, wie beispielsweise Kopfsteinpflaster fährt. Die aufgenommenen Bilder werden bei diesen extremen Erschütterungen ausgesondert, da die optischen Achsen der Momentaufnahmen nicht mehr in einer Ebene liegen. Daraus resultiert eine schlechtere Auflösung oder schlimmstenfalls der Ausfall des Systems.

Im selben Jahr als das Verfahren zur seitlichen Umgebungserkennung von der DaimlerChrysler AG publiziert wurde, erschien mit dem Patent DE 102004008867 A1 eine Entwicklungsgrundlage für eine mobile Bildverarbeitungshardware. Diese ist innerhalb eines Gehäuses eines Kleincomputers in Form eines Mobiltelefons, eines Personal Digital Assistant oder eines Palmtops verbaut. Diese kompakten Geräte beinhalten jeweils eine Anzeigeeinheit und ein Bildverarbeitungsmodul und befinden sich im Fahrzeuginnenraum. Mindestens eine Kamera, die bereits im Fahrzeug integriert sein und darüber hinaus andere Funktionen realisieren kann, sendet Bilddaten über eine Datenübertragungsleitung an den Kleincomputer. Das kann über eine Kabelverbindung erfolgen. Andernfalls ist beispielsweise eine drahtlose Bluetooth-Verbindung denkbar, sodass das Bildverarbeitungssystem die Umgebungsinformationen aus mehreren Kameras beziehen kann, die an weit voneinander entfernten Orten im Fahrzeug angebracht sind, ohne lange Drahtverbindungen nutzen zu müssen. So kann je nach Kameraausrichtung eine 360°-Ansicht für die Insassen bereitgestellt werden. Verschiedene Umgebungsbereiche können laut Patentanspruch auch mit einer beweglichen mechanischen Vorrichtung beziehungsweise einstellbaren optischen Linsen beobachtet werden. Denkbar ist auch die Nutzung eines Mobiltelefons, welches bereits über ein integriertes Kamerasystem mit ausreichender Auflösung verfügt. Nimmt die Kamera den vorderen Fahrzeugbereich auf,

können die verarbeiteten Bilder als Grundlage für Fahrerassistenzsysteme, wie zum Beispiel Abstandswarnern, Verkehrszeichenerkennung oder ACC-Regelungen, eingesetzt werden. Dabei müsste die Bildverarbeitungseinheit des Kleinstcomputers ein Hindernis erkennen und die Warnung an das zuständige Steuergerät weitergeben. Dieses entscheidet daraufhin je nach Fahrerwunsch, welche Handlung am sinnvollsten ist. Des Weiteren kann die Erfindung im Rahmen von Assistenzsysteme bezüglich der Fahrspur verwendet werden. Sie übernimmt in dem Fall die Detektion des Fahrspurverlaufes und die Ermittlung der Fahrzeugposition zur Fahrspur. Wird das Kamerasystem nicht für automatisierte Fahrfunktionen, sondern für die Insassenbeobachtung genutzt, wertet die Bildverarbeitungseinheit beispielsweise die Kopfposition und Blickrichtung aus. Die Daten können an fahrzeuginterne Sicherheitssysteme übermittelt werden. Darüber hinaus kann der oder die Fahrende mit einer zusätzlichen Software über die Anzeige des Kleinstcomputers oder des Infotainmentsystems gewarnt werden, wenn eine erhöhte Müdigkeit erkannt wurde. Vorteile dieses Bildverarbeitungssystems ist die geringe Anforderung an die Temperatur- und Feuchtigkeitsbeständigkeit, da das System für den Fahrzeuginnenraum statt beispielsweise für den Motorraum vorgesehen ist. Das Zusammenspiel mindestens zweier Bildverarbeitungseinheiten beziehungsweise Kamerasysteme ermöglicht schließlich die Erzeugung von Tiefeninformationen. ([8] o.V., S.1 ff)

Hier wird der Nachteil des Patents zum monokularen Motion-Stereo-basierten automatischen Vermessen freier Parkplätze deutlich. Dort kann mithilfe nur einer Monokamera und einer Datenverarbeitungseinrichtung bereits eine dreidimensionale Ansicht erzeugt werden. Auch die Möglichkeit den Kleinstcomputer aus dem Fahrzeug mitnehmen zu können, erscheint im Alter der Smartphones überflüssig, da sich für den/die Fahrzeugführende durch das Mitführen dieser Erfindung keine Vorteile außerhalb des Einsatzes im Fahrzeug ergeben. Außerdem ist die Prozessorleistung zu gering, um die Bildinformationen für mehrere Assistenzsysteme aufzubereiten. Auch eine entsprechende Menüführung, mit der ein Insasse eine passende Verarbeitungsalgorithmik auswählen kann, erscheint unzweckmäßig, da das automatisierte Fahren das Ziel der zunehmenden menschlichen Entlastung verfolgt. Die geringen Herstellungskosten, die aus dem niedrigen Hardwareaufwand resultieren, werden durch diese Problemstellung entkräftet.

Im Jahr 2009 wurde von der Volkswagen AG ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Erkennung der seitlichen Fahrzeugumgebung veröffentlicht. Hierbei nimmt mindestens eine Kamera während der Fahrt Bilder von der seitlichen Umgebung auf. Mittels eines Motion-Stereo-Verfahrens wird eine dreidimensionale Punktwolke aus den aufeinanderfolgenden zweidimensionalen Ansichten erstellt. Ein Bildverarbeitungssystem sucht im Bildmaterial nach Kanten und weist diese der zuvor erstellten dreidimensionalen Umgebungsabbildung zu. Es werden nur

horizontale Kanten berücksichtigt, die die Fahrbahnebene schneiden. Der Abstand dieser Bereiche wird mittels Triangulation ermittelt. Um diese Vorgehensweise realisieren zu können, wird mindestens ein Kamerasystem und eine Verarbeitungseinheit benötigt, welches die genannte Schrittfolge ausführt. ([9] Auer et al 2009, S. 1 ff)

4 Vergleich mit anderen Vermessungsmethoden

Zu den drei Patenten wurden bereits Nachteile erläutert, die den Bedarf an alternativen Methoden zur seitlichen Umgebungsbeobachtung eines Fahrzeugs unterstreichen. In den nächsten Abschnitten folgt eine Diskussion über bestehende Messmittel, die für die kommerzielle Fahrzeugumgebungsdetektion genutzt werden können.

Ultraschallsensoren werden zwar oft für die Vermessung seitlicher Parklücken genutzt, herkömmliche Exemplare weisen jedoch eine beschränkte Reichweite von maximal neun Metern auf. Querparklücken, die mehr als vier Meter vom Auto entfernt sind, können nur von kostenintensiven Ultraschallsensoren vermessen werden. Zudem haben sie, wie die merkmalsbasierten Kameralösungen den Nachteil, dass sie komplizierte Strukturen nur schwer wahrnehmen können. Darüber hinaus steigt die Messunsicherheit bei der Detektion gekrümmter oder sehr kleiner Gebilde erheblich. Deshalb werden beispielsweise Anhängerkupplungen in einigen Fällen nicht erkannt.

In der Praxis werden für die seitliche Parklückenerkennung noch keine zuverlässig funktionierenden Lösungen angeboten, die mit Kameradaten arbeiten. Es gibt zwar Lösungen, die Umgebungsinformationen von LiDAR, Radar und Ultraschall verarbeiten. Diese sind jedoch teurer als passive Kamerasysteme und können neben der Parklückenerkennung und der Kollisionswarnung nicht für das erweiterte Parken verwendet werden. Das bedeutet, dass aus den Messdaten keine ästhetisch aufbereiteten Umgebungsbilder erstellt und dem Fahrer bereitgestellt werden können.

Aus diesen Gründen entsteht das Bedürfnis der Automobilhersteller, Kamerasysteme für die seitliche Umgebungsbeobachtung zu verwenden (siehe Tesla). Es besteht die Möglichkeit, PMD-Kameras einzusetzen. Diese Photomischdetektoren nutzen das Lichtlaufzeitverfahren, indem von einer Lichtquelle mit bekannter Position Licht ausgesendet wird. Es wird die Zeit gemessen, die vergeht, bis dieses Licht durch die Reflektion an Objekten auf den PMD-Sensor auftritt. Da dieses aktive optische Verfahren eine moderate Bildqualität bei relativ hohen Hardwarekosten erzeugt und sich fast ausschließlich an Bordsteinen orientiert, entsteht der Bedarf

nach der Entwicklung einer Methode, die mit vergleichsweise günstigen passiven Kameralösungen auskommt und in jeder beliebigen Umgebung exakte Tiefenwerte liefert.

Eine ähnliche Einschränkung bringen Verfahren mit sich, die Bodenmarkierungen aufsuchen und diese interpretieren. In der Realität werden diese Begrenzungslinien nicht zuverlässig erkannt. Darüber hinaus weisen Parkplätze oftmals nur spärliche bis keine Randmarkierungen auf.

Die Methode, die dreidimensionale Umgebungsinformationen aufgrund von strukturiertem Licht ermittelt, wird in vielen technischen Bereichen angewendet. Als Streifenprojektion bekannt, wird die Methode aufgrund der präzisen Tiefenberechnung beispielsweise bei der Tatortvermessung oder der Qualitätskontrolle von Maschinenteilen angewendet. Im Straßenverkehr werden die Gesetzgeber einiger Nationen dieses Verfahren jedoch nicht genehmigen.

Kameralösungen, die Objekte anhand von Merkmalen erkennen, haben die Nachteile, dass sehr stark texturierte Objekte wie beispielsweise Büsche sowie Gegenstände, dessen Textur kaum erkennbar ist, nicht wahrgenommen werden. Daraus folgt eine geringe Anzahl an erkennbaren Punkten und damit eine ungenaue Berechnung der freien Parkfläche. Darüber hinaus werden einige Objekte an Merkmalen erkannt, die sich nicht an Objektgrenzen befinden. Dann schätzen merkmalsbasierte Lösungen die Gegenstandsdimensionen möglicherweise zu groß ein. Das kann bei der Parkplatzvermessung zu groben Fehlerkennungen führen. Ein weiterer Nachteil bestehender Bildverarbeitungsverfahren, die die seitliche Fahrzeugumgebung detektieren, ist der enorme Rechenaufwand. Eine echtzeitfähige Informationsauswertung ist mit heutigen Grafikkarten zwar möglich. Fahrzeughersteller greifen jedoch vorzugsweise zu energieeffizienteren Mobilprozessoren. Auf diesen sind die komplexen Stereoverfahren nicht echtzeitfähig. ([10] Wahl et al 2014, S. 563)

5 Inhalt des Patents DE102011083745A1

5.1 Funktionsweise der Erfindung

Um mit dem monokularen Motion Stereo-basierten Verfahren ein exaktes dreidimensionales Abbild der Umgebung zu erzeugen, müssen die Kameras korrekt kalibriert und ausgerichtet sein ([10] Wahl et al 2014, S. 564). Darüber hinaus müssen im Kamerabild radiale Linsenverzeichnungen eliminiert werden. Sie entstehen an Blenden oder begrenzenden Linsendurchmessern und führen zur lokalen Veränderung des Abbildungsmaßstabes. Das Bild erscheint leicht verformt ([11] Scholl o.J., S.2 f). Anschließend werden die Kamerapositionen zu zwei Zeitpunkten ermittelt, um die Bilder entzerren zu können. Für die Positionsberechnung

werden die vom Fahrzeug bereitgestellten odometrischen Daten verwendet. Aus den Werten der Raddrehzahl-, Lenkwinkel- und Gierwinkelsensors wird die Wegstrecke, die zwischen zwei Zeitpunkten zurückgelegt wurde, ermittelt. Dieser Wert muss anschließend mit dem Abstand der Kamera zum Fahrzeugursprung verrechnet werden. Liegen keine odometrischen Daten vor, kann alternativ anhand entsprechender statischer Bildpunkte, die in zwei Abbildungen unverzerrt auftreten, die Wegstrecke ermittelt werden.

Das Verfahren des Patents DE102011083745A1 hat die Aufgabe freie Umgebungsbereiche, die als Parkfläche genutzt werden können, zu erkennen und zu vermessen. Dem Fahrer wird die Umgebung in der Vogelperspektive visualisiert. Das entzerrte Bild zeigt die Parklücke, Hindernisse sowie eine schematische Darstellung des Kraftfahrzeugs. Des Weiteren können die durch das Verfahren gewonnenen Daten zur Kollisionswarnung genutzt werden. Diese bezieht sich primär auf dynamische Objekte, die sich im Schwenkbereich der Türen befinden.

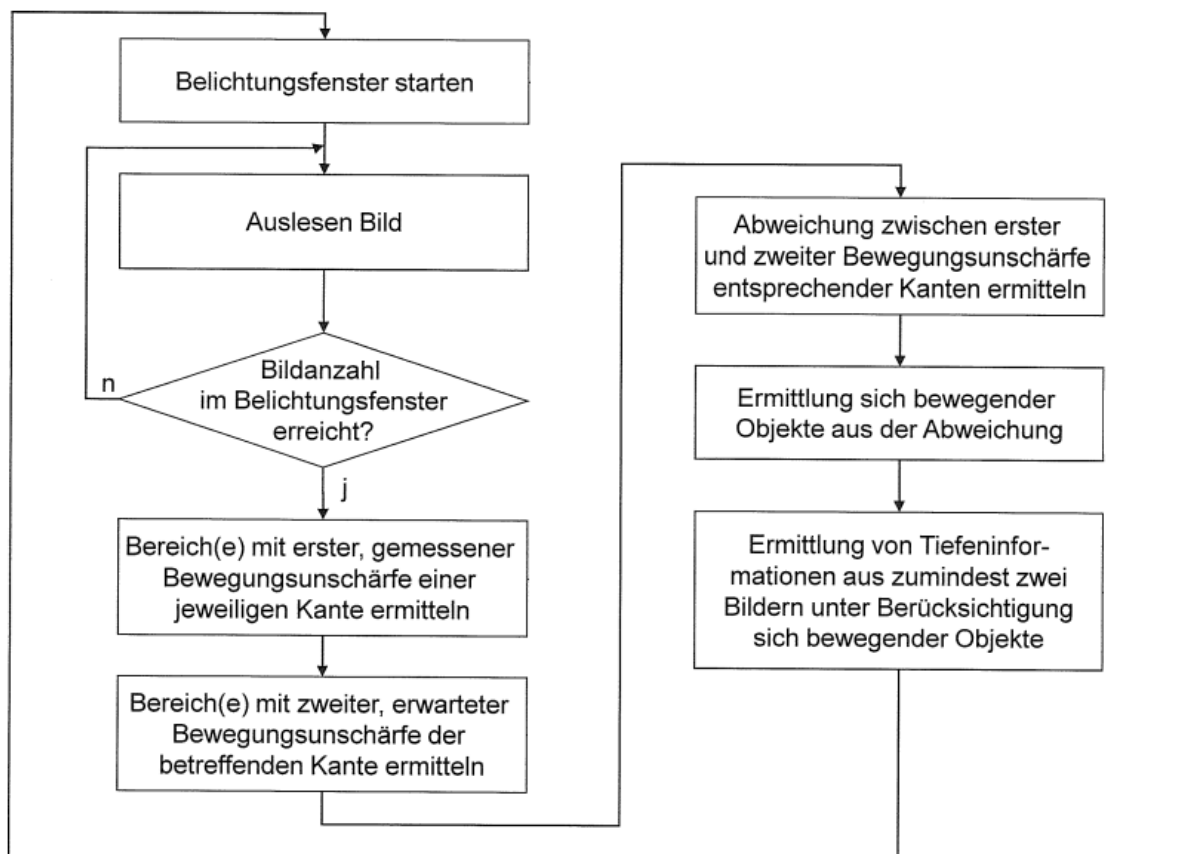


Abbildung 5.1: Programmablaufplan des Patents (Quelle: [2] Wahl und Unger 2013, S.9)

Im Folgenden wird das Verfahren zum monokularen Motion Stereo-basierten automatischen Vermessen von freien Parkplätzen anhand des Programmablaufplanes aus Abbildung 5.1 schrittweise erläutert. Es beginnt mit dem Aktivieren der Sensorchips der Kamera. Hierzu öffnet sich eine Blende beziehungsweise werden die Sensorchips eingeschaltet. Diese Pixel

werden oftmals als Kondensatoren ausgeführt. Trifft im Belichtungsfenster Licht auf diese elektrischen Bauteile, kommt es zum Spannungsanstieg. Die Ladung der Kondensatoren werden in der Ausführungsform, welche in Abbildung 5.2 abgebildet ist, erst am Ende jedes Belichtungsintervalls zurückgesetzt. Dabei wird die durch das Licht hervorgerufene Ladungstrennung am Kondensator rückgängig gemacht. Während eines Belichtungszeitraums erfolgt die Auslesung mehrerer Einzelbilder: Im Zeitintervall $t = t_1 - t_0$ wurden Informationen gesammelt, die der Zwischenauslesung ZA_1 zugeordnet werden. Die Zwischenauslesung ZA_2 gibt Auskunft über den Zeitraum $t = t_2 - t_0$. Folglich beinhaltet die Zwischenauslesung ZA_4 Informationen des gesamten Belichtungsfensters F_1 . Es entstehen stetig wachsende Belichtungszeiten der Zwischenauslesungen vom Anfang bis zum Ende eines Belichtungsfensters. Dadurch wird die Genauigkeit des Verfahrens gesteigert, da sich alle Einzelbilder auf die selbe Ausgangsposition beziehen, ohne dass eine Relativbewegung des Fahrzeugs zur Umgebung kompensiert werden muss. Es existieren Alternativen, in denen die Zeitdifferenzen der Zwischenauslesungen gleich oder auch beliebig verteilt sind. Diese entsehen beispielsweise, wenn das Zurücksetzen einer Kondensatorspannung nach jeder Zwischenauslesung erfolgt (Abb. 5.3). Die Belichtungszeiten bleiben konstant, solange die Lichtverhältnisse nahezu gleichbleibend sind. Bei ständig wechselnder Beleuchtung werden die Belichtungszeiten dynamisch an die aktuellen Lichtverhältnisse angepasst. Eine helle, kontrastreiche Fahrzeugumgebung bedarf kurze Belichtungszeiten, während ein dunkles Umfeld längere Belichtungszeiten erfordert. Das liegt daran, dass die Kondensatorspannung von der auftretenden Lichtmenge abhängt. Eine sehr helle kurze Belichtung erzielt demnach den gleichen Spannungswert wie eine längere schwache Belichtung. Die Folge sind Stereobildpaare, die unterschiedliche Belichtungsdauern aufweisen. Dadurch könnte die SAD-Methode keine exakten Werte liefern. Damit dieser Algorithmus trotzdem angewendet werden kann, schlugen die Erfinder vor, einen Histogrammausgleich durchzuführen. Wie dieser Schritt realisiert werden soll, geben die Erfinder jedoch nicht bekannt.

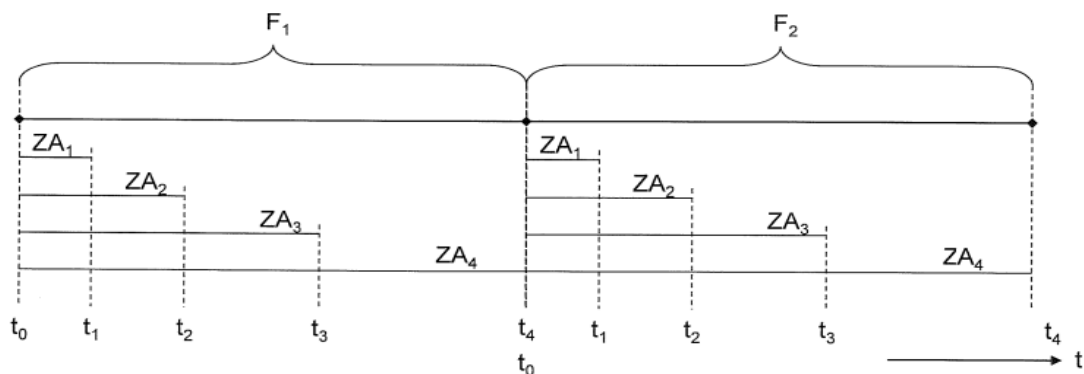


Abbildung 5.2: Zurücksetzen der Sensorchips am Ende des Belichtungsfensters (Quelle:[2] Wahl und Unger 2013, S.10)

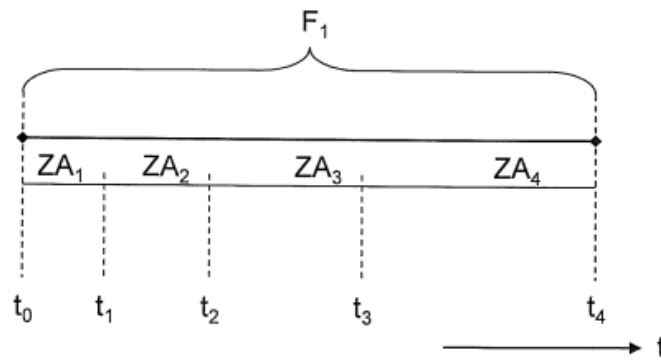


Abbildung 5.3: Zurücksetzen der Sensorchips nach jeder Zwischenauslesung (Quelle: [2] Wahl und Unger 2013, S.10)

Am Ende eines Belichtungsfensters werden die Sensorchips ausgeschaltet oder von der Blende verdeckt. Innerhalb eines Zeitraums der Belichtung werden mehrere Bilder ausgelesen. Die geforderte Bildanzahl hängt von dem herrschenden Lichtverhältnis ab. Bei dunkler Umgebung sind neben der längeren Belichtungszeit auch mehr Zwischenauslesungen erforderlich. Wurde schließlich die geforderte Bildanzahl erreicht, werden die Sensorchips ausgeschaltet oder von der Blende verdeckt. Das Belichtungsfenster wird dadurch beendet (Zeitpunkt t_4 in Abb. 5.2 und Abb. 5.3). Im Ausführungsbeispiel in Abbildung 5.2 wird unmittelbar ein neues Belichtungsfenster gestartet. Je nach Anwendung kann die Kamerasteuerung die Blende für kurze Zeit geschlossen lassen. Nach der Beendigung eines Belichtungszeitraums startet die rechnergestützte Verarbeitung der empfangenen Bildinformationen. Zuerst wird eine Rahmendezimierung durchgeführt. Durch die variierende Geschwindigkeit sind die sogenannten Grundlinien (Stereobasis) der erhaltenen Bilder unterschiedlich. Zwei Bilder, die hinsichtlich Bewegungsunschärfe untersucht werden, müssen eine Basislinie von mindestens zehn Zentimetern aufweisen. Im Rückschluss bedeutet das für eine Fahrzeuggeschwindigkeit, die unter einem kritischen Wert liegt, dass die Momentaufnahmen nicht verwendet werden können. Dieser Schwellenwert kann mit einer minimalen Stereobasis von $T_{min} = 0,1 \text{ m}$ und einer Bildrate von $f = 30 \text{ Hz}$ zu

$$v_{krit} = \frac{s}{t} = \frac{T_{min}}{\frac{1}{f}} = \frac{0,1m}{\frac{1}{30 \text{ s}^{-1}}} = 3 \frac{m}{s} = 11,8 \frac{km}{h}$$

berechnet werden. Wird dieser Wert unterschritten, wird die Basislinie zu klein, um genaue Tiefeninformationen liefern zu können. Daher muss der Belichtungszeitraum bei sehr langsamer Fahrt erhöht werden.

Anschließend werden in den Zwischenauslesungen ZA_1 bis ZA_4 kontrastreiche Hell-Dunkel-Übergänge gesucht und als Kante definiert. Diese Bereiche werden mit allen seit einem

bestimmten Zeitpunkt aufgenommenen Momentaufnahmen verglichen. Dabei werden Kanten mit Bewegungsunschärfe identifiziert.

Im darauffolgenden Schritt wird die theoretisch erwartete Bewegungsunschärfe in Abhängigkeit der Fahrzeugbewegung für diese Bereiche errechnet. Mithilfe des odometrischen Verfahrens kann die aktuelle Position des Kraftfahrzeugs geschätzt werden. Daraufhin kann das Programm simulieren, wie die Bewegungsunschärfe für stehende Objekte ausfallen müsste. Anschließend wird die Übereinstimmung der ersten (gemessenen) und der zweiten (vorausgesagten) Bewegungsunschärfe überprüft. Bereiche, die ihren Ort verändert haben, weisen hierbei eine Abweichung auf und werden aus dem Bildmaterial ausgesondert. Die Bewegungsunschärfen stehender Objekte sollten übereinstimmen. Für diese werden schließlich Abstandswerte aus den Bildaufnahmen ermittelt. Diese sind das Ergebnis der Auswertung eines Belichtungszeitraums und werden für die automatische Detektion von freien Parkplätzen genutzt. ([2] Wahl und Unger 2013, S.1 ff)

5.2 Vorgehensweise der Verarbeitungssoftware

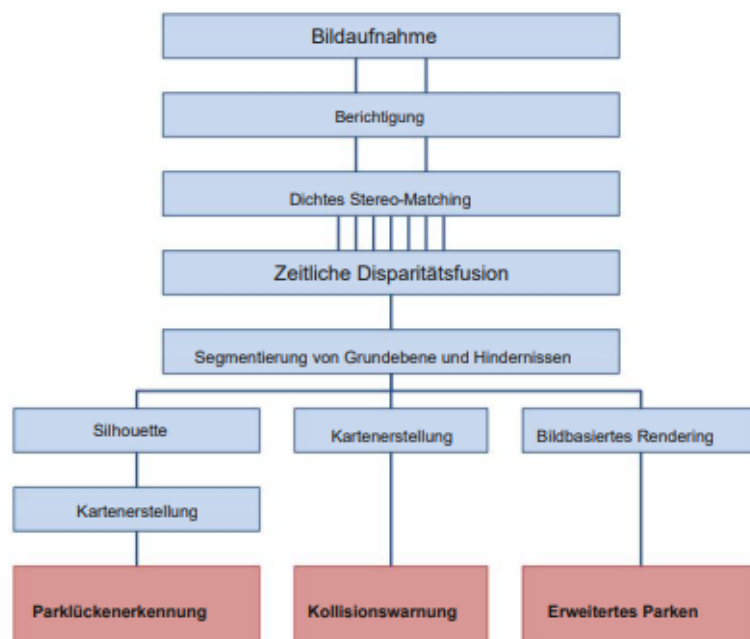


Abbildung 5.4: Ablaufschema der Bildverarbeitung (Quelle: [10] Wahl et al 2014, S. 563)

Im nachfolgenden Abschnitt wird die Verarbeitung der Bilder durch die entwickelte Software, welche sich an die Bildaufnahme anschließt, anhand des von Wahl, Unger und Slobodan veröffentlichten wissenschaftlichen Berichts detailliert erklärt. In Abbildung 5.4 ist die

Vorgehensweise strukturiert dargestellt. Die Erfindung basiert auf dem sogenannten Motion Stereo-Verfahren. Das bedeutet, dass aufeinanderfolgende Bilder, die an verschiedenen bekannten Positionen aufgenommen wurden, genutzt werden, um metrische Daten für Bildpunkte zu berechnen. Das bereits erläuterte SAD-Verfahren liefert skalare Werte für Stereobildpaare, die von ihrer Größe und Belichtung gut zusammenpassen. Diese Zahlen werden im Rahmen der Verarbeitungssoftware für jeden Pixel in zweidimensionale Flussvektoren umgewandelt. Es wird iterativ sowohl die horizontale als auch die vertikale Verschiebung ermittelt. Dies bildet die Grundlage für die Erkennung von Objekten. Die erhaltenen Disparitätskarten werden auf das aktuellste Stereopaar projiziert. Ist die Voraussetzung erfüllt, dass die Kamerazentren auf einer horizontalen Linie parallel zur Fahrtrichtung liegen, so können bis zu 16 Disparitätskarten fusioniert werden um im aktuellen Stereopaar Bewegungsunschärfen zu ermitteln. Schließlich erstellt die Software eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion über allen betrachteten Unterschieden der fusionierten Disparitätskarten. Damit kann die wahrscheinlichste Disparitätskarte ausgewählt werden. Diese ähnelt der Wirklichkeit am meisten. Anschließend wird in dieser Ansicht die Grundebene markiert. Der Algorithmus teilt das Bild in horizontale Scanlines ein. Da in der Bodenfläche innerhalb einer Scanlinie kaum Deviationen zu erwarten sind, kann das Programm den Bereich der Grundebene abschätzen. Dabei geht es sukzessive vom unteren Bildrand bis zur Scanlinie vor, in der die Disparitäten wieder stärker variieren. Den Erfindern gelang es, ein Algorithmus zu entwerfen, der in der Lage ist, die Anzahl an sogenannten Ausreißern für jede Scanlinie abzuschätzen. Ausreißer sind die Pixel, die entweder durch Fehler in der Bilderfassung oder in der Verarbeitung nicht der Realität entsprechen. Daher werden Scanlines, deren Ausreißerzahl über einem gewissen Schwellenwert liegen, nicht beachtet. Nach der Abschätzung der Bodenfläche, werden dem Bild vertikale Abtastlinien hinzugefügt. Das Programm überprüft entlang dieser Linien, ob in der abgeschätzten Bodenfläche beispielsweise unwahrscheinlich große Disparitätssprünge vorhanden sind. Da der Boden als dunkle homogene Ebene angenommen wird, werden solche Bereiche korrigiert. Nun kann die Grundebene segmentiert werden. Das bedeutet, dass alle Pixel, die im unteren Bildbereich liegen und wenig Hell-Dunkel-Wechsel beziehungsweise Disparitäten aufweisen, thematisch zum Objekt Grundebene zugeordnet werden. Dabei markiert die Software die Übergänge zu Hindernissen und zum Horizont. Außerdem wird die berechnete Horizontlinie hinzugefügt. Treten innerhalb einer erfassten Parklücke Löcher im Boden auf, kann mithilfe eines Schließalgorithmus eine ebene Parkfläche modelliert werden. Bei einer unebenen Fahrbahn wird die wahre Oberfläche durch eine plane Fläche angenähert. Somit lässt sich später der Parkplatz simpler vermessen. Nach der Bodensegmentierung versucht die entwickelte Software nun für Hindernisse Silhouetten zu erstellen und diesen Bildkoordinaten zuzuordnen.

Dazu werden erneut Hell-Dunkel-Wechsel aufgesucht. Der im optimalen Fall konstant beleuchtete Himmel sowie der bereits markierte Boden müssen in der Segmentation der Hindernisse nicht berücksichtigt werden. In Abbildung 5.5 ist ersichtlich, dass diese Einteilung in Objektklassen, wie Boden, Hindernis und Himmel zum einen die Übersichtlichkeit fördert und zum anderen die spätere Vermessung durch die Definition klarer Objektgrenzen vereinfacht. Die erhaltene Abbildung wird später für die Parklückenerkennung und für andere Applikationen benötigt.

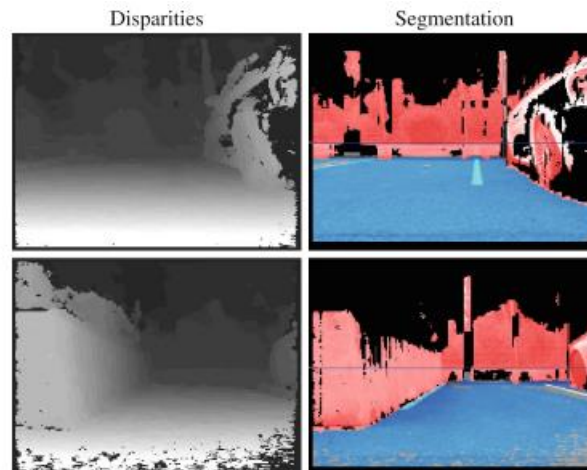


Abbildung 5.5: Ergebnis der Segmentation (Quelle: [10] Wahl et al 2014, S. 568)

Wenn ein Freiraum ausreichend Platz bietet und begrenzende Hindernisse erkannt wurden, wird im Anschluss schrittweise ein Entfernungsprofil erzeugt. Das x-y-Koordinatensystem wird so groß gewählt, dass die seitliche Umgebung im Tiefenbereich bis circa zehn Meter dargestellt werden kann. In den wenigsten Fällen sind begrenzende Elemente von Parkflächen weiter als zehn Meter vom Fahrzeug entfernt. Wenn dieser Fall doch eintritt, kann die Skalierung der Tiefenachse aufgrund der hohen Kamerareichweite erhöht werden. Um diese metrischen Daten errechnen zu können, wird zunächst der Bereich neben dem Fahrzeug in der Vogelperspektive dargestellt. Dazu wird die beschriebene Karte, welche in Abbildung 5.6 zu sehen ist, in die segmentierte Bodenebene projiziert. Diese Methode kann als gewünschte Verzerrung betrachtet werden. Die erhaltene Draufsicht wird in gleichgroße Quadrate unterteilt. Nun werden die zuvor berechneten Silhouetten dem Bild zugeordnet. Fährt das Kraftfahrzeug weiter, werden weitere Disparitätskarten mit Silhouetten ermittelt. Diese Objektumrisse werden der Draufsicht hinzugefügt. Dabei wird jeder Zelle eine Wahrscheinlichkeit zugeordnet, die erhöht wird, wenn sich Silhouetten an dieser Stelle überlagern.

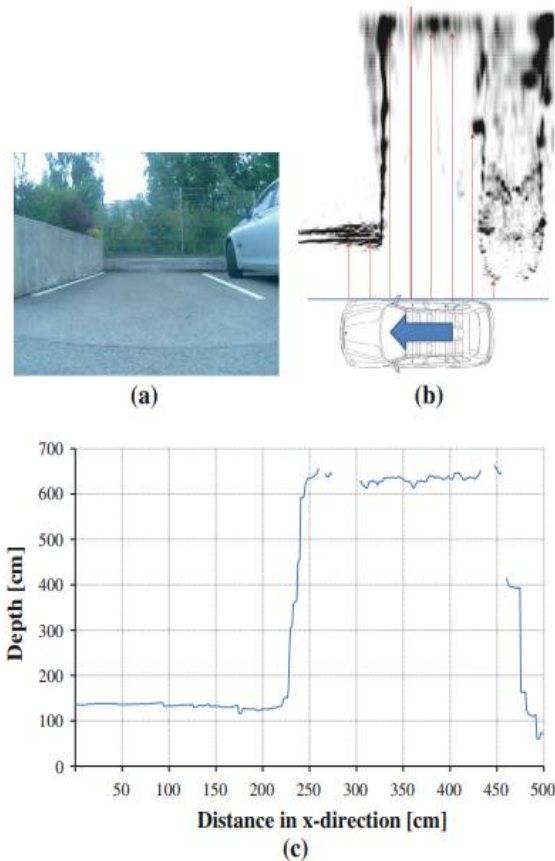


Abbildung 5.6: Ermittlung der Tiefenwerte einer Parkfläche (Quelle: [10] Wahl et al. 2014, S.569)

Da durch unterschiedliche Bodenneigung oder durch Erschütterungen die Horizontlinie von aufeinanderfolgenden Abbildungen variieren kann, können möglicherweise Entfernungsangaben nicht mehr mit hoher Genauigkeit ermittelt werden. Das Verfahren nimmt den kleinen Fahrbahnbereich neben einer freien Parklücke als eben an und sortiert mögliche Bilder aus, deren synthetische Horizontlinie sich stark von den Anderen unterscheidet. Variationen in der Lage der Horizontlinie können auch aus einer fehlerhaften Bodensegmentierung resultieren. Hat die Seitenkamera des Fahrzeugs die Parklücke vollständig aufgenommen, werden nun die Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Quadrate untersucht. Den Zellen höchster Wahrscheinlichkeit werden Punkte zugeordnet. Diese werden benötigt um daraus im letzten Schritt das Entfernungsprofil abzuleiten. Dazu wird in einem Koordinatensystem ein Graph entlang der Punkte erstellt, die die Abgrenzung der Parkfläche darstellen sollen. Aus dem Abstand des Graphen vom Fahrzeug wird die Tiefe der Parklücke berechnet. Die Entwickler definieren ein Intervall, mit dem der Tiefenwert der Parklücke eingeschränkt wird. Für Querparklücken werden Tiefenwerte von mindestens vier Metern erwartet. Ein Maximalwert gibt es nicht. Parkflächen, die parallel zur Fahrzeugbewegungsrichtung angeordnet sind, dürfen zwischen zwei und vier Meter tief sein. Die

tatsächliche Tiefe berechnet das Programm anhand ausgewählter Hindernisse. Dafür wird die letzte hochqualitative und die aktuelle Abbildung untersucht. Aus diesen beiden Bildern werden jeweils zwei Teilmengen aus den Hindernissilhouetten ausgewählt. Die eine Teilmenge befindet sich im seitlichen Bereich neben der Front des Autos und die andere Gruppe liegt neben dem Heck des Kraftfahrzeugs. Nun wird für jedes Bild der Mittelwert der Tiefenwerte gebildet, die die Teilmengen aufweisen. Der Größere von den beiden erhaltenen Tiefenwerten ist das Endprodukt der Parklückenvermessung. Die Länge des Fahrzeugs muss größer als die Tiefe des Parkplatzes sein, wenn es sich um eine Parklücke quer zur Straße handelt. Möchte der Fahrer in eine Parklücke parallel zur Fahrbahn einscheren, muss die ermittelte Tiefe größer als die Fahrzeugbreite sein. Außerdem muss das System gewisse Toleranzen berücksichtigen, um dem Fahrer das Einparken zu erleichtern. Ist das Fahrzeug mit einem automatischen Parkassistenten ausgestattet, könnte den Insassen über die Benutzeroberfläche angezeigt werden, ob der Freiraum geeignet wäre, um mithilfe der Einparkautomatik oder mithilfe des Einparkassistenten das Auto darin korrekt abzustellen. Freiräume in der seitlichen Umgebung, die genügend Platz zum Einparken bieten, werden ignoriert, wenn der Lenkwinkel oder die Geschwindigkeit einen festgelegten Grenzwert überschreiten. Der Algorithmus geht in diesen Fällen davon aus, dass der Fahrzeugführer nicht die Absicht verfolgt, das Fahrzeug in dieser Lücke abzustellen. Außerdem kann das bereits erläuterte Problem der Variation in der Lage der synthetischen Horizontlinie bei zu großen Abweichungen zum Ablehnen der Einparkoption führen.

Um den Insassen die Momentaufnahmen nahezu in Echtzeit zu präsentieren, werden oftmals sogenannte „interlaced“ Grafiken verwendet. Diese liefern sofort eine Abbildung, die zum Zeitpunkt der Abfrage noch sehr unscharf ist, da nur vereinzelte Bildpixel beleuchtet werden. Mit der Zeit werden immer mehr Pixeln in der Darstellung die gewünschte Farbe zugeordnet, sodass die Bildqualität zunimmt. Dank der heute realisierbaren Datenübertragungsleistung fällt dieser iterative Prozess den Insassen kaum auf. ([10] Wahl et al 2014, S.561 ff)

5.3 Anforderungen an die Hardware

Die benötigte Vorrichtung umfasst für die rechte und linke Fahrzeugseite jeweils eine Seitenkamera, die im vorderen Kotflügel des Fahrzeugs angebracht sein kann. Sie werden üblicherweise senkrecht zur Fahrzeuglängsachse und parallel zum Boden ausgerichtet. Damit können sie als zusätzliche Funktion den/die Fahrer/-in an Kreuzungen bereits über den querenden Verkehr informieren, wenn die Einsicht in den Querverkehr durch Sichtbehinderungen noch nicht möglich ist. Die Seitenkameras können auch beim Ausparken aus unübersichtlichen Parklücken nützlich sein. Sie sind meist mit Standardobjektiven ausgerüstet.

Neben den Lateralkameras in der beschriebenen Ausführung werden Top View-Kameras für die seitliche Umgebungsbeobachtung eingesetzt. Sie befinden sich in den meisten Fällen im unteren Teil des Außenspiegelgehäuses oder in der B-Säule und bieten dem/der Fahrer/-in eine Rundumsicht. Sie sind daher mit Weitwinkelobjektiven ausgestattet. Es wird die seitliche nähere Umgebung auf einem Monitor bei niedrigen Geschwindigkeiten beziehungsweise beim Ein- und Ausparken dargestellt. Die Erfinder schlagen vor, dass die beiden Kameratypen mit der VGA-Auflösung, sprich mit 640x480 Pixeln für 30 Bilder pro Sekunde arbeiten sollen. Für die Verarbeitung der Bilder und die Erstellung der Disparitätskarten zur Erzielung der Tiefeninformationen wird die Auflösung auf 213x160 Pixel reduziert. Die Parkplatzdetektion sollte aus genannten Gründen mithilfe einer monokularen Kamera realisiert werden, vorzugsweise mit der Seitenkamera für die entsprechende Fahrzeugseite. Es besteht zwar auch die Möglichkeit das beschriebene Verfahren mit einer Top-View-Kamera durchzuführen, doch um die Disparitätskarten zu erstellen, muss das empfangene Bild erst entzerrt werden. Das bedeutet, dass sowohl der Rechenaufwand als auch die Fehlerwahrscheinlichkeit höher im Vergleich zum Betrieb mit Seitenkameras sind. Die erhöhte Ungenauigkeit resultiert aus dem Weitwinkelobjektiv, das im interessierenden Bereich gegenüber Standardobjektiven über eine geringere Auflösung verfügt. Des Weiteren haben die Draufsichtkameras die Eigenschaft, dass das Störsignal gegenüber dem Nutzsignal vergleichsweise groß ist. Dieser Wert wird als Signal-Rausch-Verhältnis definiert.

5.4 Diskussion des Patents

Aus den genannten wirtschaftlichen und technischen Gründen entwickelten die Erfinder Wahl und Unger ein Verfahren zur automatischen Vermessung freier Parklücken mithilfe des monokularen Motion Stereo-Prinzips. Neben der Vielzahl an erläuterten Vorzügen gegenüber anderen Messmethoden existieren einige Problemstellungen, die mit der Erfindung nicht behoben werden können:

Das System hat Schwierigkeiten bei groben Unebenheiten durch die gesteigerte Wank- und Nickbewegung die aufgenommenen Bilder auf Disparitäten zu untersuchen, da die SAD-Methode eine parallele Ebene zur Oberfläche benötigt, auf der die Abbildungszentren virtuell liegen. Um die negativen Auswirkungen zu kompensieren, wird der Sichtbereich der Kamera leicht erweitert. Das erfordert eine höhere Rechenleistung und funktioniert nur bei geringen Bodenunebenheiten. Bei gewölbten Parkflächen, wie es zum Beispiel oftmals bei altem Kopfsteinpflaster der Fall ist, entsteht die Problemstellung, dass bei der Segmentierung der Grundebene falsche Horizontlinien angenommen werden könnten, da die Software eine künstliche flache Oberfläche erstellt. Darüber hinaus wird bei fehlender Bodenbegrenzung eine

Gedankenlinie anhand parkender Fahrzeuge erzeugt. Diese Annahmen führen möglicherweise zu groben Messfehlern. Der Einsatz einer Kamera für das automatische Vermessen von freien Parkflächen hat, wie bereits erläutert, zwar ökonomische Vorteile. Ultraschallsensoren senden allerdings von der Beleuchtung unabhängige Messdaten.

Des Weiteren führt eine Verschmutzung der Linse, ähnlich wie bei anderen Messmethoden, zu groben Messfehlern. Ist das Fahrzeug mit mehreren Kameras ausgestattet, wie es heute und in naher Zukunft der Fall sein wird, wäre es in diesem Fall möglich, eine alternative Kamera zu nutzen, die Bilder der seitlichen Fahrzeugumgebung aufnehmen kann. Die größte Herausforderung sind sogenannte repetitive Strukturen. Diese weisen ein sich ständig wiederholendes Muster auf. Der Motion Stereo-Ansatz kann in diesem Fall nicht eindeutig die Begrenzung eines Bildes festlegen, da die Orientierung anhand dieser Struktur kompliziert ist. Zaunpfosten, die in äquivalenten Abständen aufgebaut sind und die gleiche Form, Farbe und Textur aufweisen, können nicht als Referenzobjekte genutzt werden, da die Kamera nicht in der Lage ist, die Pfosten voneinander zu unterscheiden. Erkennt das System genügend andere Anhaltspunkte, wirkt sich die genannte Schwäche nicht negativ auf das Ergebnis aus. In einer schlecht beleuchteten Parksituation schwindet jedoch die Zahl eindeutig erkennbarer Objekte. Dann führt die falsche Zuordnung repetitiver Strukturen im ungünstigsten Fall zum Versagen des Systems. Die Parklücke kann folglich nicht vermessen werden, sofern keine alternativen Messmittel verbaut sind. Der entwickelte Algorithmus wird ebenfalls abgebrochen, wenn die Geschwindigkeit oder der Lenkwinkel einen Grenzwert überschreiten. Dann werden freie Parkflächen ignoriert, da das System davon ausgeht, dass der/die Fahrer/-in nicht mehr das Ziel verfolgt, das Auto abzustellen.

Trotz der genannten Einschränkungen entstehen durch das vorgestellte Verfahren einige Vorteile, die für die zukünftige Mobilität von Bedeutung sein können: Es werden Hindernisse erkannt, die abhängig vom Sichtwinkel des Kameraobjektivs sich im seitlichen, hinteren sowie vorderen Bereich des Fahrzeugs befinden. Darüber hinaus kann bei einer seitlichen Kamera, die nach hinten gerichtet ist, der tote Winkel verlässlich auf Personen und Hindernisse untersucht werden. Nicht zuletzt wird das Schadenrisiko beim Ein- und Ausparkvorgang verringert. Die aufgenommenen und verarbeiteten Bilddaten können neben der Parkplatzvermessung für die Warnung vor potenziellen Kollisionen verwendet werden. Diese beziehen sich auf den Schwenkbereich der Türen sowie den sogenannten toten Winkel schräg hinter dem Fahrzeug. Da mithilfe der Analyse der Bewegungsunschärfe bereits zwischen dynamischen und statischen Objekten unterschieden wird, benötigt die Sicherheitsfunktion der Kollisionswarnung keinen eigenen aufwändigen Verarbeitungsalgorithmus. Neben der automatischen Vermessung freier Parkplätze und der Kollisionswarnung werden die aufbereiteten Messwerte für das

„augmented parking“ genutzt. Hierbei wird in einem Bildschirm im Fahrzeuginnenraum die Parksituation visualisiert. Diese umfasst die freie Parkfläche, angrenzende Hindernisse sowie das Ego-Fahrzeug selbst. Für diese Anwendung müssen die Bilder noch zusätzlich aufbereitet werden. Der Großteil des Verarbeitungsaufwandes ist allerdings der neu entwickelten Software zuzuordnen. Da mit einer Datenbearbeitung drei Fahrzeugapplikationen realisiert werden, kann zum einen der Rechenaufwand minimiert werden. Daraus resultiert eine schnellere Laufzeit der jeweiligen Anwendung. Des Weiteren können je nach Wunsch des Herstellers Prozessoren beziehungsweise Steuergeräte eingespart werden, da die Berechnung der geforderten Informationen zentral in einem Rechenmodul stattfinden kann. Handelt es sich um ein Kraftfahrzeug, welches über Funktionen verfügt, die neben der Abstandsmessung, die Visualisierung des Fahrzeugumfelds umfasst, werden üblicherweise Ultraschallsensoren für die metrische Wertegewinnung verwendet. Die Umgebungsdarstellung wird anhand von Kameradaten erstellt. Da diese Kamera mit der neuartigen Erfindung auch Abstandswerte messen kann, werden die Ultraschallsensoren überflüssig. Der Verzicht auf diese Messeinrichtung unterstreicht den wirtschaftlichen Vorteil des vorgestellten Verfahrens. Die Verfasser des Patents haben ein Experiment durchgeführt, in welchem sie die Fehlerrate einzelner Vermessungssysteme, die in Fahrzeugen für die Parkplatzvermessung eingesetzt werden, mit dem entworfenen System vergleichen. Die gemessene relative Fehlerhäufigkeit betrug beim monokularen Motion Stereo-basierten Verfahren mit Seitenkamera rund $P = 3,5 \%$. Wird die Top-View-Kamera genutzt, erhöht sich der Fehlerwert auf circa $P = 6,8 \%$. Mit $P = 4,0 \%$ Fehlerhäufigkeit liegt die Ultraschalllösung dazwischen. Das von Unger und Wahl durchgeführte Experiment zeigt demnach auf, dass die Erfindung ein wenig zuverlässiger funktioniert als eine ultraschallbasierte Lösung ([10] Wahl et al 2014, S. 574).

Das nachfolgende Wahrscheinlichkeitsdiagramm visualisiert die Vorzüge des neu patentierten Verfahrens. Es ist die Wahrscheinlichkeitsverteilung über der Größe des Messfehlers dargestellt.

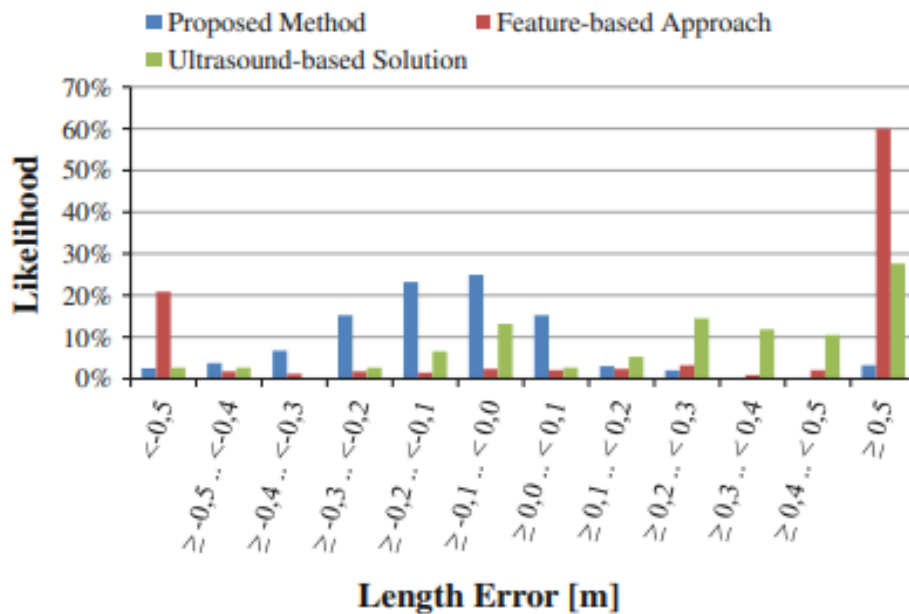


Abbildung 5.7: Verteilung der Messfehler: vorgestellte Methode verglichen mit merkmalsbasierten Kameraverfahren sowie Ultraschallverfahren (Quelle: [10] Wahl et al 2014, S. 574)

Bei der merkmalsbasierten Kameramethode weichen rund 80 Prozent der gesamten Messfehler mindestens einen halben Meter vom wahren Messwert ab. Mithilfe des Ultraschallverfahrens werden Distanzen vorwiegend größer angezeigt, als in der realen Umgebung angezeigt. Das Verfahren, welches im vorgestellten Patent beschrieben wird, erzeugt die Mehrheit der Abweichungen im Bereich unter 30 Zentimeter. Insgesamt vermisst es die Parklücke eher kleiner als in Realität, was bei der Anwendung im Fahrzeug als Sicherheitsfaktor betrachtet werden kann. Die anderen beiden Methoden zeigen die Parklücken mehrheitlich zu groß an, was in der Praxis schwerwiegende Folgen haben kann. Des Weiteren ist die Fehlerwahrscheinlichkeit der Patentmethode annähernd normalverteilt. Das bedeutet, dass die kleinsten Abweichungen, die kleiner als zehn Zentimeter sind, am häufigsten auftreten. Da im praktischen Anwendungsfall Fehler unter rund 15 Zentimeter akzeptabel sind, handelt es sich hierbei um ein zuverlässiges Verfahren, welches über eine hohe Messgenauigkeit verfügt. Dem gegenüber können bei der kamerabasierten Lösung aufgrund der erhöhten Abweichung vom realen Wert, spürbare Fehlhandlungen des Systems auftreten. Solche Ausreißer wirken sich negativ auf die Kundenzufriedenheit aus. ([10] Wahl et al 2014, S. 564 ff)

6 Anwendungsbeispiele

Die ausführlich erklärte Bildverarbeitung der seitlichen Fahrzeugumgebung kann neben dem automatischen Vermessen von Parklücken und der Kollisionswarnung für das sogenannte

„augmented parking“ genutzt werden. Eine Ausführung dieser Funktion veröffentlichte der BMW-Konzern bereits auf der „Auto Shanghai 2015“. Dabei wurden mit einer Virtual-Reality-Brille, welche mit dem Fahrer interagiert, beispielsweise die Geschwindigkeit und das Tempolimit virtuell über dem Lenkrad angezeigt. Neben vielen weiteren Funktionen konnte diese Brille Bilder anzeigen, die von einer seitlichen Kamera am Spiegel aufgenommen wurde. Das soll die Übersicht beim Einparken verbessern, ohne dass der Blick ständig auf dem Multimediasdisplay gerichtet sein muss, welches ebenfalls die seitliche Umgebung visualisiert. Es lässt sich vermuten, dass mit der Erfindung des monokularen Motion Stereo-basierten Vermessens von Parklücken über die Seitenkamera, auf welche die Brille ohnehin schon zugreift, die visualisierte Parkfläche vermessen werden kann. Der Messwert könnte dem/der Bediener/-in anschließend angezeigt werden. Diese „augmented reality“-Brille ist ein Prototyp und wird voraussichtlich nicht in größeren Stückzahlen produziert. ([12] BMW Group PressClub 2023)

Außer dieser beschriebenen Anwendung, wurde kein Fahrzeug gefunden, in welchem die Erfindung genutzt wurde. Am Beispiel des Automobilherstellers Tesla ist jedoch ersichtlich, dass in Zukunft wahrscheinlich mehr kamerabasierte Messverfahren für die seitliche Fahrzeugumgebungsbeobachtung eingesetzt werden:

Nach der Entfernung des Radarsensors 2021, verzichtet Tesla ab Oktober 2022 auf alle Ultraschallsensoren. Das betraf zuerst nur das Model 3 und das Model Y. Ab 2023 wurde dieser Schritt auf die anderen beiden Fahrzeugreihen Model X und Model S ausgeweitet. Grund dafür sind wahrscheinlich die zusätzlichen Kosten, die Ultraschallsensoren verursachen, da in allen Modellen der Firma Tesla ohnehin Kameras verbaut sind. Außerdem wird die Tiefenmessung je nach Objektiv auch für Objekte möglich, die weiter als zehn Meter entfernt sind. Mithilfe dieser ursprünglich acht optischen Messmittel möchte Tesla im Rahmen von „Tesla Vision“ die bisher verfügbaren automatisierten Fahrfunktionen realisieren und darüber hinaus Objekte identifizieren und klassifizieren können. Da der amerikanische Automobilhersteller aus Kostengründen zum großen Teil auf monokulare Kameras statt Stereokameras für die jeweiligen Umgebungsbereiche setzt, ist anzunehmen, dass das von Tesla verwendete Verfahren, dem des vorgestellten Patents ähnelt. Leider sind aussagekräftige Quellen über das detaillierte Funktionsprinzip des optischen Messsystems nicht zu finden. Denkbar ist auch, dass Tesla mit einer merkmalsbasierten Kameralösung die Umgebung auf erkennbare Objekte absucht. Als Vorrichtung nutzt Tesla acht Kameras, die im gesamten Fahrzeugumkreis Bilddaten liefern.

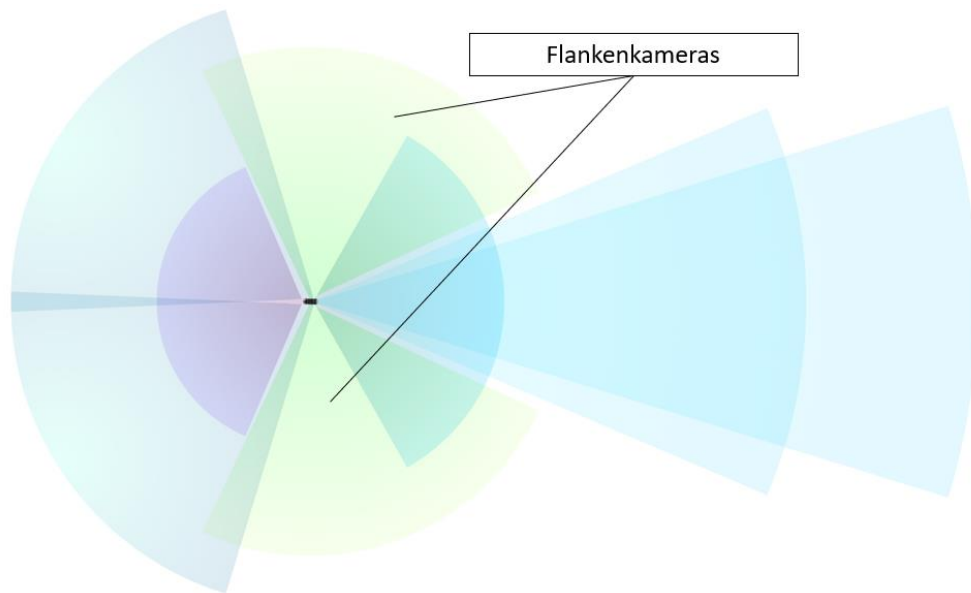


Abbildung Fehler! Verwenden Sie die Registerkarte 'Start', um 0 dem Text zuzuweisen, der hier angezeigt werden soll.1: Sichtbereiche der von Tesla verbauten Kameras (Quelle: [13] Tesla Autopilot 2023)

In Abbildung 6.1 sind die beiden nach vorn gerichteten Flankenkameras gekennzeichnet. Sie sind anders als von BMW im Patent zum monokularen Motion Stereo-basierten automatischen Vermessen freier Parkflächen vorgeschlagen, nicht als Seitenkamera im Spiegel oder im vorderen Kotflügel ausgeführt. Mit einem 90° Öffnungswinkel sind sie in der B-Säule des Kraftfahrzeugs angebracht und nehmen das seitliche Umfeld war. Sie dienen der automatischen Parkplatzvermessung, die beim Vorbeifahren einer freien Parklücke gestartet wird. Die Seitenkameras haben darüber hinaus die Aufgabe, den querenden Verkehr in unübersichtlichen Kreuzungssituationen zu beobachten. Außerdem erkennen diese Flankenkameras Fahrzeuge, die in die Fahrspur des Autos der Firma Tesla einscheren möchten. Die Bilder der acht Kameras werden von einem leistungsfähigen Zentralrechner verarbeitet. Dieser übernimmt die Funktion der ursprünglich verbauten Steuergeräte im Fahrzeug. ([13] Tesla Autopilot 2023)

Im nachfolgenden Test wurde ein Tesla Model 3 untersucht, dass das Update, welches per Fernzugriff die Software für die kamerabasierten Fahrautomationen in dem zugehörigen Steuergerät implementiert, beinhaltet. In diesem wurden braune Pappkartons, die auf dem Boden lagen oder hochkant vor dem Fahrzeug standen, nicht erkannt. Vermutlich wurden diese eher selten auftretenden Objekte bei der Bodensegmentierung als Teil der Bodenfläche interpretiert. Zudem nimmt das System schmale Objekte, wie Laternen nicht wahr. Ein weiteres Defizit stellen spiegelnde oder transparente Oberflächen dar. Die Software erkennt nur die sich spiegelnden Lichteffekte, jedoch nicht die Spiegeloberfläche selbst. Trotzdem gab es einige Objekte, die das optische Prinzip sehr gut erkannt hat. Das gilt für Verkehrsteilnehmer wie Fahrzeuge, Fußgänger und Radfahrer. Auch eine weiße Wand, die für Kamerasysteme sehr

schwer zu identifizieren ist, wurde ohne Probleme detektiert. Die realen Abstandswerte wurden allerdings circa dreißig Zentimeter zu groß angezeigt. Die kamerabasierte Lösung enthüllte sogar Vorzüge gegenüber den Ultraschallsensoren: Es werden Büsche oder andere komplexe Geometrien besser erkannt. Außerdem ist die Abstandsmessung zu niedrigen Bordsteinen möglich, was beim Einparken in Längsparklücken erhebliche Vorteile hat, indem der Fuß- und Radverkehr auf angrenzenden Gehwegen sowie die Reifen und Felgen geschont werden. Außerdem wird auf Grundlage der Abstandsinformationen die Parklücke exakt vermessen. Das Versuchsfahrzeug ist in der Lage, den freien Platz zuverlässig zu erkennen und automatisiert darin einzuparken. Ultraschallsensoren hätten die Freifläche eventuell zu groß abgeschätzt, da sie die Kantensteine übersehen hätten. Beim Vorwärtsparken hat diese Eigenschaft den Vorteil, dass der vordere Fahrzeugüberhang nicht über diese flachen Begrenzungsobjekte hinausragt, da das Fahrzeug automatisch stoppt, bevor sich die Front über dem Hindernis befindet. Ultraschallsensoren würden diese Parksituation zwar ebenfalls bewältigen, würden sich jedoch an einer Hauswand oder anderen begrenzenden Objekten orientieren, weshalb das System den Fahrer ohne Warnung mit dem Rad bis an den Bordstein fahren lässt. Somit kann die Frontschürze beziehungsweise die Ölwanne und der Unterboden vor Schäden geschützt werden und Personen auf angrenzenden Gehwegen werden nicht durch die hinausragende Fahrzeugfront behindert. Das getestete Tesla Model 3 speichert die Lage und die Eigenschaften dieser Hindernisse ab und informiert die Insassen auch nach einer zwischenzeitlichen Abschaltung des Elektrofahrzeugs über diese Gefahrenstellen.

7 Zusammenfassung

Im Rahmen des dargestellten Tests des „Tesla Vision“-Projekts im Tesla Model 3 wurde aufgezeigt, dass die Ultraschallsensoren für die Detektion naher Objekte momentan noch zuverlässiger funktionieren. Allerdings ist hierbei zu beachten, dass diese Messtechnik zusammen mit der Verarbeitungssoftware über mehr als zwei Jahrzehnte ständig weiterentwickelt wurde. Aus diesem Grund setzen Automobilhersteller vorzugsweise diese Technik in der Umfeldsensoren ein. Sie werden vermutlich auch in naher Zukunft für die Vermessung von Parklücken und nahen Objekten eingesetzt. Kameras werden erst seit kürzerer Zeit vermehrt für die Detektion und Vermessung der nahen Fahrzeugumgebung verwendet. Wird hier ein ähnlicher Entwicklungsaufwand in neue und effektivere Verfahren investiert, wird aus der heute noch zum Teil unzuverlässigen optischen Lösung in den nächsten Jahren ein System, welches aufgrund der geringen Kosten und der vielseitigen Anwendbarkeit Ultraschall- und Radarsensoren verdrängen wird. Aus diesem Grund hält Tesla an einer rein kamerabasierten Umgebungsvermessung fest. Der Automobilhersteller nutzt in seinen Fahrzeugen eine Art neuronales Netz, mit dem die Verarbeitungssoftware auf neue Umgebungseigenschaften angelehrt werden kann. Fahrzeuge des Unternehmens Tesla, die noch Ultraschallsensoren verbaut haben, könnten diese möglicherweise wieder aktivieren, um diesen Lernprozess der künstlichen Intelligenz zu unterstützen, indem die Kameradaten validiert werden. Ein sehr großer Vorteil, welcher den Einsatz von reinerameratechnik als Grundlage für automatisierte Fahrfunktionen bestärkt, ist die Ähnlichkeit des menschlichen Sehens verglichen mit der Bilderzeugung von Kameras. Diese liefern Umgebungsinformationen, die vom Menschen einfach verstanden und hinterfragt werden können. Die Weiterentwicklung dieser optischen Messmethoden erfolgt damit möglicherweise schneller. Im erläuterten Experiment von Unger und Wahl erzielte die Erfindung bei der Nutzung einer Seitenkamera schon 2018 eine um $\Delta P = 0,5 \%$ geringere relative Fehlerhäufigkeit als die Vermessung mit Ultraschallwellen. Aus den genannten Gründen wird die optimierte Software den Vorteil der kamerabasierten Messung verstärken, sodass das Verfahren zum monokularen Motion Stereo-basierten automatischen Vermessen freier Park in naher Zukunft wahrscheinlich in etwas abgewandelter Ausführung in Fahrzeugen eingesetzt wird.

Literatur und Quellenverzeichnis

- [1] Meyer, Helmuth:
Umfrage zum Parken: Was sich Auto- und Radfahrer wünschen; Veröffentlichung vom 01.08.2022
<https://www.adac.de/verkehr/standpunkte-studien/mobilitaets-trends/umfrage-parken/>, Abruf: 17.04.2023
- [2] Wahl, Eric, Dr.; Unger, Christian:
Verfahren zum monokularen Motion-Stereo-basierten automatischen Vermessen von freien Parkplätzen, angemeldet durch Bayerische Motoren Werke Aktiengesellschaft, 80809, München, DE
Veröffentlichungsnr: DE 10 2011 083 745 A1, 04.04.2013
- [3] Tiziani, Hans, Prof.:
Optische Methoden der 3-D-Meßtechnik und Bildverarbeitung, o.O, o.J.
- [4] Ma, YouQing; Liu, ShaoChuang; Sima, Bing; Wen, Bo; Peng, Song; Jia, Yang:
A precise visual localisation method for the Chinese Chang'e-4 Yutu-2 rover, 2020; In: Photogrammetric record 35 (169), S. 10–39. DOI: 10.1111/phor.12309.
- [5] Burger, Wilhelm; Burge, Mark James:
Digitale Bildverarbeitung Eine algorithmische Einführung mit Java. 3., 2015, Heidelberg: Springer
- [6] H. Niitsuma; T. Maruyama: Sum of Absolute Difference Implementations for Image Processing on FPGAs, 2010; In: 2010 International Conference on Field Programmable Logic and Applications, S. 167–170.
- [7] Bräunl, Thomas, Prof. Dr., Perth, AU; Franke, Uwe, Dr.-Ing:
Verfahren und Vorrichtung zur videobasierten Beobachtung und Vermessung der seitlichen Umgebung eines Fahrzeugs, angemeldet durch DaimlerChrysler AG, 70567 Stuttgart, DE
Veröffentlichungsnr: DE 000010244148 A1, 08.04.2004
- [8] o.V.:
Bildverarbeitungssystem für Kraftfahrzeuge, angemeldet durch DaimlerChrysler AG, 70567 Stuttgart, DE
Veröffentlichungsnr: DE 102004008867 A1, 09.09.2004

- [9] Auer, Richard, Dr.; Brosig, Stefan, Dr.; Mossau, Daniel; Rosebrock, Dennis; Spehr, Jens:
Verfahren und Vorrichtung zur Erkennung der Umgebung eines Kraftfahrzeugs, angemeldet durch Volkswagen AG, 38440 Wolfsburg, DE
Veröffentlichungsnr: DE 102009005553 A1, 01.10.2009
- [10] Unger, Christian; Wahl, Eric; Ilic, Slobodan:
Parking assistance using dense motion-stereo: Real-time parking slot detection, collision warning and augmented parking, 2014, In: Machine Vision and Applications 25 (3), S. 561-581
- [11] Scholl, Veronika:
Verzeichnung und Brillenanpassung; o.J.
https://opus-htw-aalen.bsz-bw.de/frontdoor/deliver/index/docId/565/file/Scholl_Veronika_BA.pdf, Abruf: 22.04.2023.
- [12] BMW Group PressClub:
MINI Augmented Vision: Ein revolutionäres Anzeige- Konzept für mehr Komfort und Sicherheit. Exklusiver Prototyp einer Augmented Reality-Brille unterstreicht die Innovationskraft und Kreativität der Marke MINI, Veröffentlichung 2023
<https://www.press.bmwgroup.com/austria/article/detail/T0212103DE/mini-augmented-vision:-ein-revolutionaeres-anzeige-konzept-fuer-mehr-komfort-und-sicherheit-exklusiver-prototyp-einer-augmented-reality-brille-unterstreicht-die-innovationskraft-und-kreativitaet-der-marke-mini>, Abruf: 22.04.2023
- [13] Tesla DE:
Autopilot, o.J.
https://www.tesla.com/de_DE/autopilot/3, Abruf: 10.04.2023
- [14] Nico Pliquet:
TESLA Vision Park Assist - Der große Praxis Test! Nie wieder Ultraschallsensoren?, Veröffentlichung am 28.03.2023
https://youtu.be/U_dKd_rbAjA, Abruf: 20.04.2023

Eidesstattliche Erklärung

Das vorliegende Dokument wurde an der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden unter der Leitung von Prof. Dr. rer. nat. Toralf Trautmann angefertigt. Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit zum Thema

**„DE102011083745A1 - Verfahren zum monokularen Motion Stereo-basierten
automatischen Vermessen von freien Parkplätzen“**

selbstständig und ohne Benutzung anderer Quellen und Hilfsmittel als angegeben angefertigt habe. Insbesondere versichere ich, dass ich alle wörtlichen und sinngemäßen Übernahmen aus anderen Werken als solche kenntlich gemacht habe. Ferner gestatte ich der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, die vorliegende Diplomarbeit unter Beachtung insbesondere urheber-, datenschutz- und wettbewerbsrechtlicher Vorschriften für Lehre und Forschung zu nutzen.

Ruhland, den 30.04.2023

Ort, Datum



Unterschrift