Kapitel 3

Technische Realisierungsaspekte einer optischen Kfz-Innenraumüberwachung

Inhaltsangabe

3.1	Motivation	31
3.2	Kameraposition	32
3.3	Dynamik der Beleuchtung im Fahrzeug	39
	3.3.1 Globale Dynamik im Fahrzeug	40
	3.3.2 Lokale Dynamik im Fahrzeug	44
	3.3.3 Einfluß optischer Filter	50
3.4	Vergleich der CMOS- und CCD-Technologie	53
3.5	CMOS-Kameras	59
3.6	NIR-Bildaufnahme	66
3.7	Kalibration	75
3.8	Zusammenfassung	78

3.1 Motivation

Nachdem im letzten Kapitel die aktuellen Systeme zum Innenraumschutz und zur Kindersitz-, Sitzbelegungs- und Out-of-Position-Erkennung vorgestellt wurden, werden in diesem Kapitel technischen Anforderungen an eine optische Kfz-Innenraumüberwachung erarbeitet. Zu diesem Zweck werden diese Anwendungen optischer Innenraumschutz (OIS) und optische Belegungszustandserkennung (OBE) genannt. Unter der OBE versteht man hier neben der optischen Sitzbelegungserkennung auch die optische Kindersitz- und die optische Out-of-Position-Erkennung. Der Oberbegriff für alle optischen Anwendungen im Innenraum von Kraftfahrzeugen ist die optische Innenraumüberwachung.

Im Falle der Diebstahlwarnanlage muß der OIS in der Lage sein, Objekte zu lokalisieren, die in den Innenraum des Fahrzeugs eindringen. Unter dem Begriff "Unerlaubtes Eindringen einer Person oder eines Gegenstandes " fallen folgende Fälle:

- Entwenden von Wertgegenständen aus dem Fahrzeug
- Diebstahl des Fahrzeugs

Ideal wäre es, wenn der Versuch des Diebstahls schon im Ansatz, also vor dem gewaltsamen Öffnen des Fahrzeugs, erkannt wird. Besonders schwierige Situationen treten auf, wenn das Fahrzeug nicht vollständig verschlossen wurde (z.B. offenes Fenster oder offenes Verdeck). In diesen Fällen ist es nicht mehr möglich, den Versuch eines Diebstahls im Ansatz von einem berechtigten Eingreifen zu unterscheiden. Bei einem Diebstahl des Fahrzeugs selbst wird der Dieb als erstes versuchen, die Überwachung von außen lahm zu legen. Gelingt dieses dem Dieb nicht, bleibt der Innenraumüberwachung ein kurzer Zeitraum, in dem der Dieb versuchen wird in das Fahrzeug einzudringen kann. Auch hier ist es wünschenswert, den Versuch im Ansatz zu erkennen. Eine große Herausforderung stellen offene Fahrzeuge, wie Cabrio oder Roadster, dar, für die bislang noch kein vollständiger Innenraumschutz existiert. Aufgrund des Prinzips der optischen Bildaufnahme sollte die optische Innenraumüberwachung in der Lage sein, auch offene Fahrzeuge zu überwachen.

Für die sicherheitsrelevanten Anwendungen kann mit der optischen Innenraumüberwachung eine optische Sitzbelegungserkennung (SBE) derart realisiert werden, daß ab einer bestimmten Objektgröße der Sitz als belegt angesehen wird. Da das optische System über eine räumliche Auflösung verfügt, können unterschiedliche Regionen überwacht werden, die auf die Anwesenheit oder Nicht-Anwesenheit schließen lassen. Die erste Klassifizierung sollte zwischen dem Öffnen des Fahrzeugs und dem Beginn der Fahrt geschehen. Während der Fahrt sollte dieser Zustand in regelmäßigen Abständen überprüft werden.

Die optische Kindersitzerkennung (KSE) muß durch eine Analyse der Bilder entscheiden, ob ein Reboard-Kindersitz auf dem Sitz montiert ist oder nicht. Sie umfaßt somit eine wesentlich komplexere Merkmalsextraktion und Klassifikation als die optische SBE. Hierbei kann die KSE auf die Ergebnisse der optischen SBE zurückgreifen, da die SBE einerseits die Belegung und andererseits die Bereiche der Veränderung angeben kann. Eine kritische Anforderung ist, daß die KSE alle im Moment auf dem Markt zugelassenen und zukünftigen Kindersitze erkennen kann. Es müssen also Merkmale extrahiert werden, die für alle Reboard-Kindersitze typisch sind. Bei der Out-of-Position (OOP) Erkennung muß der Abstand zwischen dem Körper der Person und dem Airbag bestimmt werden. Nur wenn der Abstand ausreichend groß ist, darf der Airbag freigeschaltet werden. Die optische Methode bietet im Vergleich zu den bestehenden Verfahren die Möglichkeit, den Abstand direkt messen zu können. Um eine solche Messung zu realisieren, ist es notwendig, nicht nur Kindersitze zu erkennen, sondern auch Personen und bestimmte Körperbereiche, wie Oberkörper oder Beine, zu lokalisieren.

Bei der optischen SBE und KSE reicht es aus, wenn man den Zustand in Abständen von einigen Sekunden überprüft, da die Änderung eines Belegungszustandes einen ähnlichen Zeitraum in Anspruch nimmt. Hinzu kommt, daß eine grundlegende Änderung der beiden Zustände während der Fahrt sehr unwahrscheinlich ist. Die OOP-Erkennung muß wesentlich häufiger durchgeführt werden, da eine Person relativ schnell eine nicht reguläre Sitzposition einnehmen kann.

Somit kann als Hauptanforderungen an eine optische Innenraumüberwachung, worunter der optische Innenraumschutz und die optische Belegungszustandserkennung fallen, die Lokalisierung und Klassifizierung von Objekten genannt werden. Während für den OIS eine Einstufung der Objekte nach der Größe ausreichen wird, muß für die OBE eine echte Zuordnung der Objekte in verschiedene Klassen erfolgen.

Um die unterschiedlichen Zustände erkennen zu können, muß zuerst sichergestellt werden, daß die Merkmale von den Bildsensoren aufgenommen werden. Hierzu werden in diesem Kapitel die Anforderungen an die Bildakquisition zur Realisierung der optischen Innenraumüberwachung analysiert. Darunter fällt die Kameraposition, die sicherstellen muß, daß alle relevanten Merkmale aufgenommen werden und die optischen Anforderungen an die Bildakquisition im Fahrzeug, die auch von der Kameraposition beeinflußt werden. Daraus bestimmt sich ein weiterer wichtiger Punkt: die Sensorik, die nicht nur auf die Verhältnisse bezüglich der Beleuchtung sondern auf die extremen Umweltbedingungen im Fahrzeug angepaßt sein muß. Hierzu wurden die im Moment verfügbaren Technologien verglichen und unterschiedliche Sensoren bzw. Kameras im Fahrzeug untersucht. Zu den erweiterten Anforderungen zählt die Kalibration einer Bildakquisition, die in diesem Fall eine Unterscheidung zwischen Innen- und Außenraum ermöglichen soll. Diese kann durch Toleranzen während des Einbaus wesentlich gestört werden.

Aufgrund der extremen Einflüsse der Beleuchtung wird eine spezielle Aufnahmetechnik vorgeschlagen, die in der Lage ist störende externe Beleuchtungseinflüsse zu unterdrücken.

3.2 Kameraposition

32

Neben den im vorigen Abschnitt diskutierten Anwendungen, die nicht nur vorhandene Sensoren und Systeme ersetzen sollen, sondern zum Teil nur durch die Bildsensorik möglich werden, sind weitere Applikationen vorstellbar, die mit einem Bildverarbeitungssystem realisiert werden könnten (siehe Abschnitt 6.1). Es ist aber nicht ohne Weiteres möglich, eine Position zu bestimmen, ohne zu wissen, welche Merkmale die Verarbeitung benötigt. Eine Vorauswahl der möglichen Positionen scheint aber sinnvoll zu sein, da dann nur die Positionen näher betrachtet werden, die möglichst viele Merkmale in den Bildern enthalten.



Abbildung 3.1: Kamerapositionen

Eine Voraussetzung für eine Position, die für unterschiedliche Anwendungen geeignet sein soll, ist, daß möglichst viel von dem jeweils in Frage kommenden Bereich aufgenommen wird. In diesem Fall bedeutet dies, daß versucht wird den gesamten Innenraum aufzunehmen. Die Fähigkeit einer Kamera einen Bereich aufzunehmen wird hauptsächlich durch den Feldwinkel bestimmt. Der notwendige Feldwinkel w einer Optik wird durch die größte Breite des zu beobachtenden Bereiches d_{max} und dem Abstand zwischen Kamera und Beobachtungsbereich a festgelegt. Zusätzlich muß unterschieden werden, ob die Position der Kamera zum beobachteten Bereich zentriert ist (siehe Abb. 3.1). Ist die Kamera über den zu überwachenden Bereich zentriert bestimmt sich der Feldwinkel folgendermaßen:

$$w = \tan\left(\frac{d_{max}}{2a}\right) \tag{3.1}$$

Grundsätzlich werden von allen Objektiven Verzeichnungen im Bildbereich erzeugt. Verzeichnungen sind Abbildungsfehler, die durch Nichtlinearitäten, des Objektivs entstehen. Je größer der Feldwinkel ist, desto größer sind auch die Verzeichnungen, die u.U. durch Maßnahmen im Objektiv oder bei der Auswertung der Bilder berücksichtigt werden müssen. Zusätzlich muß bei der Auswahl der Position darauf geachtet werden, daß es zu keinen Verdeckungen von relevanten Bereichen kommt.

In der Abb. 3.1 wurden in die Aufsicht eines Fahrzeugs die in Frage kommenden Positionen qualitativ eingezeichnet. Die Werte in Tabelle 3.1 sind typische Meßwerte aus Fahrzeugen der oberen Mittelklasse. Klein- und Großraumfahrzeuge, sowie Geländefahrzeuge wurden nicht in bei den Messungen berücksichtigt. Positionen die in den untersuchten Fahrzeugen in Frage kommen, können ohne große Änderungen in Großraum und Geländefahrzeuge übernommen werden, da durch das hohe Dach der Abstand zwischen Kamera und Beobachtungsbereich größer ist und somit der notwendige Feldwinkel kleiner ausfällt. Kleinfahrzeuge stellen an die Optik ähnliche Anforderungen.

In der Tabelle 3.1 sind neben den Positionen auch der notwendige Feldwinkel, die Mindestanzahl der Kameras N und die verdeckten Bereiche eingetragen. Die Positionen beziehen

34

Nr.	Position	(x, y, z) in cm	2w	N	Ab- schattung
1	Instrumenten Kombi Blick Fahrer/Beifahrer	(38, 20, 0)	120°	2	${ m Sitze,}\ { m hinten}$
2	B-Säule Dachhimmel Blick zur Mitte	(118, 26, 36)	150°	2	Insassen und Sitze
3	Außenspiegel-Dreieck Blick Fahrer/Beifahrer	(24, 20, 0)	90°	2	${ m Sitze,}\ { m hinten}$
4	A-Säule Dachhimmel Blick Fahrer/Beifahrer	(58, 26, 34)	160°	2	${ m Sitze,}\ { m hinten}$
5	Innenraumschutz (FIS/USIS Position) Blick nach unten	(138, 77, 39)	150°	1	Sitze, vorn und hinten
6	Innenspiegel Blick nach unten	(69, 77, 37)	150°	1	${ m Sitze,}\ { m hinten}$
7	Innenraumschutz (FIS/USIS Position) Blick nach hinten	(138, 77, 39)	150°	1	Sitze, vorn

Tabelle 3.1: Kamerapositionen

sich auf das in Abb. 3.1 eingezeichnete Koordinatensystem. Der Feldwinkel w wurde in der jeweiligen Position so berechnet, daß die für die Anwendungen notwendigen Bereiche im Bild enthalten sind. Bei den Positionen, die zwei Kameras vorsehen, wurde die Position einer Kamera angegeben, wenn die Position der zweiten Kamera an der Längsachse des Fahrzeugs gespiegelt ist. Die gespiegelten Positionen sind mit einem ' gekennzeichnet.

Für den optischen Innenraumschutz (OIS) ist es notwendig den gesamten Innenraum aufzunehmen und zwar derart, daß der Innenraum vom Außenbereich getrennt werden kann. Zu diesem Zweck würde sich eine mittlere Position im Dachhimmel sehr gut eignen. In Tabelle 3.1 sieht man, daß der OIS nicht mit einer Kamera allein realisiert werden kann, da in jeder Position Abschattungen durch die vorderen Sitze erzeugt werden.

Die Position 5 ist zur vorgeschlagenen zentralen Position am Dachhimmel am nächsten. Abb. 3.2 zeigt eine Aufnahme mit einer CCD-Kamera aus dieser Position. Obwohl das Objektiv einen Feldwinkel von $2w = 150^{\circ}$ in der Diagonalen besitzt, wird nicht der gesamte Innenraum erfaßt. Die Bereiche vor den B-Säulen sind durch die Sitze derart abgedeckt, daß ein Eingriff von der Kamera nicht erfaßt werden kann. Besonders extreme Verdeckungen werden erzeugt, wenn die vorderen Sitze sehr weit nach vorn oder sehr weit nach hinten eingestellt werden. In diesen Fällen können sogar Teile der Instrumententafel oder der hinteren Sitzbank verdeckt werden. Der Schutz von Objekten, die durch die Sitze verdeckt werden, kann unter diesen Umständen nicht garantiert werden.

Wie auch die anderen Positionen aus Tabelle 3.1 zeigen, ist es nicht möglich, mit einer Kamera allein den gesamten Innenraum zu beobachten. Teilt man aber den Innenraum in einen vorderen und einen hinteren Innenraum auf, so bietet sich für die vorderen Sitze die Position 6 vor dem Innenspiegel im Bereich des Innenlichts zur Innenraumüberwachung an. Eine Positionierung im Innenlicht wäre denkbar, wobei die Temperaturanforderungen



Abbildung 3.2: Innenraumaufnahme aus Position Nr. 5



Abbildung 3.3: Innenraumaufnahme aus Position Nr. 6



Abbildung 3.4: Innenraumaufnahme aus Position Nr. 7

an die Kamera erhöht werden. Abb. 3.3 zeigt eine Aufnahme aus dieser Position. Aus dieser Position kann sowohl der gesamte vordere Innenraum als auch Teile des hinteren Innenraums beobachtet werden. Es sind viele Situationen vorstellbar, in denen es ausreicht, nur den vorderen Innenraum zu überwachen. Besonders bei Fahrzeugen, die hauptsächlich als Zweisitzer konzipiert wurden, wie z.B. Cabrio, Roadster und Coupe, ist die Überwachung des vorderen Innenraums ausreichend.

In einigen Ländern (siehe Abschnitt 2.2 und [24]), wie z.B. in Großbritannien, wird von einer Innenraumüberwachung gefordert, daß sie auch den hinteren Innenraum überwacht. Für diesen Fall könnte eine zweite Kamera in der Position 5, die nach hinten ausgerichtet ist, dazu benutzt werden, um den hinteren Innenraum zu überwachen (siehe Abb. 3.4). Für größere Fahrzeuge mit zusätzlichen Sitzbänken könnte man weitere Kameras einsetzen, die die weiteren Bereiche aufnehmen. Hierbei ist es nicht notwendig, die Bildverarbeitung zu verändern. Es reicht aus, die Bilder der zusätzlichen Kameras zu einem Gesamtbild zusammen zufügen und mit den selben Algorithmen zu verarbeiten.

Die Position 2 ist für den OIS nur bedingt geeignet, da – wie man in Abb. 3.5 sieht – für die Lokalisierung eines Eingriffs von außen nur ein schmaler Streifen genutzt werden kann. Wenn der vordere Sitz sehr weit vorn steht, verdeckt die Kopfstütze nahezu die gesamte Instrumententafel. Eine Überwachung der Instrumententafel ist in dieser Situation nicht möglich.

Die Position der A-Säule (Nr. 4) eignet sich für den OIS ebenfalls nicht, da wichtige Bereiche durch die Sitze verdeckt werden können(siehe Abb. 3.6). Allein für die Überwachung des vorderen Innenraums werden zwei Kameras benötigt, wobei der hintere Innenraum nicht vollständig eingesehen werden kann. Da sich Position 3 von Position 4 nur in der Höhe unterscheidet, ist diese Position für den OIS ebenfalls nicht geeignet. Position 1 wurde hauptsächlich für die optische Belegungszustandserkennung (OBE) in Betracht gezogen. Sie ist für die OIS nicht geeignet. Die Bereiche, die für die OBE wichtig sind, sind die vorderen Sitze und darunter besonders der Beifahrersitz, da auf diesem neben der Sitzbe-



Abbildung 3.5: Innenraumaufnahme aus Position Nr.2



Abbildung 3.6: Innenraumaufnahme aus Position Nr. 4



Abbildung 3.7: Innenraumaufnahme aus Position Nr. 1

legung und der Out-of-Position-Erkennung, die Kindersitzerkennung durchgeführt werden muß. Auf dem Fahrersitz ist lediglich die OOP-Erkennung erforderlich. Zur frontalen Aufnahme der vorderen Sitze sind die Positionen 1, 3, 4 und 6 geeignet, wobei in der Position 1 die Aufnahme des Fahrersitzes nur den oberen Teil des Sitzes zuläßt. Die Position 1 wird in Abschnitt 5.3.2 für die Untersuchung von Algorithmen zur Gesichtsdetektion verwendet, da aus dieser Position die Gesichter mit den geringsten Verzeichnungen aufgenommen werden. In Abb. 3.7 ist aus der Position 1 der Beifahrersitz abgebildet.

In der Position 3 wird die Sicht auf den Fahrersitz durch das Lenkrad verdeckt. Die Position 4 ist für diesen Zweck zwar gut geeignet, jedoch wird für jeden Sitzplatz eine separate Kamera benötigt.

Unter den hier vorgeschlagenen Positionen ist die Position Nr. 6 im Bereich des Innenspiegels für die Überwachung des vorderen Innenraums am besten geeignet. Für den OIS kann sowohl der Tür- als auch der Instrumententafel Bereich eingesehen werden. Eine Verstellung der vorderen Sitze hat keinen negativen Einfluß auf die beobachtbaren Bereiche. Zusätzlich können noch Bereiche außerhalb des Fahrzeugs überwacht werden, um Aktivitäten neben dem Fahrzeug aufnehmen zu können. Die Aufnahme aus dieser zentralen Position hat den zusätzlichen Vorteil, daß er in jedem Fahrzeug, sogar im Cabrio und Roadster, vorhanden ist und für Eingriffe von außen schlecht zugänglich ist. In dieser Position bietet es sich an, die Kamera in die Innenraumbeleuchtung zu integrieren. Neben der Einsparung an Platz und Material ist dieser Einbauort relativ sicher gegen Vandalismus, da die Kamera nicht direkt bemerkt wird. Zusätzlich ist die Wahrscheinlichkeit einer Verdeckung aus dieser Position sehr niedrig.

Die zentrale Position hat den Vorteil, daß für den hinteren Innenraumbereich und even-



Abbildung 3.8: Innenraumaufnahme aus Position Nr. 6 mit Person

tuell weitere Sitzbänke jeweils nur eine zusätzliche Kamera benötigt wird. Die Bilder der zusätzlichen Kameras könnten zu einem Gesamtbild verschmolzen und verarbeitet werden.

Zur Verdeutlichung wurde in der Abb. 3.54 auf Seite 78 der überwachbare Raum, der sich aus der Position Nr. 6 ergibt, im Inneren des Fahrzeugs hell herausgestellt worden. Ein weiterer Grund für die Position Nr. 6 ist, daß sie für die OBE gut geeignet ist. Benötigt man für die OBE die Gesichter der Personen, muß die Optik soweit erweitert werden, daß auch die Gesichter aufgenommen werden. In Abb. 3.8 ist für einen Belegungszustand eine Person auf dem Beifahrersitz aus dieser Position aufgenommen worden.

Nachdem die Position der Kamera festgelegt ist, werden die spezifischen Verhältnisse, die mit dieser Position zusammenhängen untersucht. Der folgende Abschnitt behandelt die Änderungen der Beleuchtung im Fahrzeug.

3.3 Dynamik der Beleuchtung im Fahrzeug

Die Akquisition von Bildern im Fahrzeug muß auf die physikalischen Einflüsse, die in dieser Umgebung herrschen, angepaßt sein. Auch wenn es sich um eine Anwendung im Innenraum eines Fahrzeuges handelt, wird die Helligkeit von den Lichtverhältnissen im Außenbereich stark beeinflußt. Somit reicht die Helligkeit von 100 mlx bei Nacht oder in einer unbeleuchteten Tiefgarage bis 100 klx an hellen Tagen ohne direkte Sonnenstrahlung. Obwohl dies einer Dynamik von 120 dB entspricht, kann davon ausgegangen werden, daß die gesamte Dynamik nicht in einer Aufnahme auftritt. Die durch Eigen- und Fremdbewegung erzeugten globalen und lokalen zeitlichen Veränderungen in der Beleuchtung werden in diesem Abschnitt untersucht.

Die stärkste Lichtquelle, der eine Kamera im Inneren eines Fahrzeugs am Tage ausgesetzt ist, ist die Sonne. Im Mittel erreicht die Sonne in Europa eine maximale Bestrahlungsstärke bei direkter Bestrahlung von 1000 W/m^2 . Durch die Position der Kamera und der Reflexionsfaktoren der Oberflächen im Fahrzeug ist die maximale Bestrahlungsstärke niedriger. Die minimale Bestrahlungsstärke wird in Garagen und sternenklaren Nächten erreicht. Die Extremwerte der Bestrahlungsstärken legen die globale Dynamik der Beleuchtung im Fahrzeug fest. Diese tritt wie man sich leicht vorstellen kann, in den seltensten Fällen zu einem Zeitpunkt auf, so daß eine Kamera in der Lage sein sollte, die minimal und maximal auftretenden Bestrahlungsstärken zu detektieren, sie muß sie aber nicht zwingend in einem Bild aufnehmen können.

Moderne Kraftfahrzeuge erreichen ohne weiteres eine Höchstgeschwindigkeit von 250 km/h und mehr. Durch die hohe Eigenbewegung wird besonders in Kombination mit statischen Objekten, wie z.B. Bäume oder Häuser, eine hohe zeitliche Dynamik der Bildinhalte erzeugt. Weitere Ursachen für die Änderung der Bestrahlungsstärke sind Scheinwerferlicht von entgegenkommenden Fahrzeugen bei Nacht, Reflexionen von Scheinwerferlicht auf nasser Fahrbahn oder Bewegungen von Objekten, wie z.B. Personen oder Pflanzen, in der Nähe des Fahrzeugs, die zu einem zeitlich veränderlichen Schatten im Innenraum führen. Eine Kamera muß in der Lage sein, Szenen mit der so erzeugten Dynamik in einem Bild aufzunehmen.

Um die geeignete Kamera spezifizieren zu können, wurden die tatsächlich auftretenden Bestrahlungsstärken im Fahrzeug gemessen. Es wurden Aufnahmen mit einem Powermeter [50] und einer hochdynamischen CMOS-Kamera (siehe Abschnitt 3.5) gemacht, mit denen es möglich ist, auf die globale und lokale Bestrahlungsstärke im Fahrzeug zu schließen. Das Powermeter mißt die globale Bestrahlungsstärke, die einen Mittelwert über den gesamten Raum vor dem Sensor darstellt. Die Kamera jedoch mißt, wegen der Bildpunkte und des Objektivs, die lokalen Bestrahlungsstärken.

Um die Meßwerte interpretieren zu können, müssen diese in objektive Daten, die unabhängig von den Eigenschaften der Sensoren sind, umgewandelt werden. Zudem ist es notwendig, die Meßwerte in Bestrahlungsstärken zu wandeln, um die Messungen mit anderen Messungen vergleichen zu können. Hierzu werden zuerst in den nächsten Abschnitten die notwendigen Zusammenhänge hergeleitet.

3.3.1 Globale Dynamik im Fahrzeug

Ein lichtempfindlicher Halbleiter wandelt die auf die Fläche des Sensors A_{Sensor} eintreffenden Photonen in einen Ausgangsstrom I_{Sensor} um. Dieser Strom ist das Integral der Bestrahlungsstärkendichte $H_{e,Quelle}(\lambda)$ multipliziert mit der spektralen Empfindlichkeit des Sensors $R_{e,Sensor}(\lambda)$ über den Wellenlängenbereich, in dem der Sensor empfindlich ist.

$$I_{Sensor} := A_{Sensor} \cdot \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} H_{e,Quelle}(\lambda) \cdot R_{e,Sensor}(\lambda) \, d\lambda \tag{3.2}$$

In Gleichung (3.2) zeigt sich, daß die spektrale Verteilungsdichte der Quelle – hier die Sonne – entscheidend den Ausgangsstrom beeinflußt. Interessant ist aber das Integral der spektralen Verteilungsdichte $H_{e,Quelle}$, die Bestrahlungsstärke genannt wird. Die direkte Messung mit Hilfe eines Spektrometers ist im Fahrzeug aufgrund der vielen Meßwerte



Abbildung 3.9: Spektrale Verteilungsdichte des Sonnenlichts

im Zeit- und Spektralbereich zu aufwendig. Eine Möglichkeit die Bestrahlungsstärkendichte der Quelle abzuschätzen besteht darin zuerst mit Hilfe eines Spektrometers den charakteristischen Verlauf des Spektrums der Quelle zu bestimmen und dann die Bestrahlungsstärkendichte folgendermaßen zu berechnen:

$$H_{e,Quelle}(\lambda) := k \cdot H_{e,Norm}(\lambda). \tag{3.3}$$

Das normierte Spektrum $H_{e,Norm}(\lambda)$ der Quelle wird also mit Hilfe des Faktors k gestreckt, der die Höhe der Bestrahlungsstärke über alle λ gleich gewichtet. Die spektrale Verteilung der Sonnenstrahlung ist beispielhaft in Abb. 3.9 dargestellt.

Setzt man Gleichung (3.3) in Gleichung (3.2) ein und löst nach k auf erhält man:

$$I_{Sensor} = A_{Sensor} \cdot \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} k \cdot H_{e,Norm}(\lambda) \cdot R_{e,Sensor}(\lambda) d\lambda$$
$$k = \frac{I_{Sensor}}{A_{Sensor} \cdot \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} H_{e,Norm}(\lambda) \cdot R_{e,Sensor}(\lambda) d\lambda}$$
(3.4)

Die Bestrahlungsstärke der Quelle bestimmt sich nach Gleichung (3.3) zu:

$$H_{e,Quelle} = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} H_{e,Quelle}(\lambda) d\lambda$$
$$= k \cdot \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} H_{e,Norm}(\lambda) d\lambda. \qquad (3.5)$$

42



Abbildung 3.10: Meßaufbau mit Powermeter im Fahrzeug

Setzt man die Gleichung (3.4) in Gleichung (3.5) ein dann erhält man den Zusammenhang zwischen dem Ausgangsstrom des Bildsensors und der Bestrahlungsstärke der Quelle.

$$H_{e,Quelle} = I_{Sensor} \cdot \frac{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} H_{e,Norm}(\lambda) \, d\lambda}{A_{Sensor} \cdot \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} H_{e,Norm}(\lambda) \cdot R_{e,Sensor}(\lambda) \, d\lambda}$$
(3.6)

Nachdem der Zusammenhang zwischen Sensorstrom und Bestrahlungsstärke hergeleitet wurde, können die Messungen interpretiert werden. Bei den Messungen wurde der Sensor des Powermeters in der Nähe der Position Nr. 6 (siehe Tabelle 3.1) montiert. Es wurden Meßwerte im Stand und während der Fahrt, bei sonnigem und bewölktem Wetter im Sommer aufgenommen. In Abb. 3.10 links ist der Sensor und rechts der Aufbau im Fahrzeug abgebildet.

Eine Messung ist in Abb. 3.11 beispielhaft abgebildet und zeigt eine Fahrt auf der Autobahn 3 und 9 von Düsseldorf nach München bei sonnigem Wetter. Während der Messung treten einige Maxima auf, die durch Reflexionen im Innenraum erzeugt wurden. Im Mittel ist aber eine niedrigere Bestrahlungsstärke zu erkennen, die vom Sonnenstand relativ zum Fahrzeug abhängt. Gegen Ende der Fahrt ist gut zu erkennen, wie die Bestrahlungsstärke wegen der untergehenden Sonne stetig abnimmt.

$\operatorname{Betriebsart}$	Minimum	Maximum	Dynamik
Stand	$1,\!1\!\cdot\!10^{-4}{ m W/m^2}$	$50{ m W/m^2}$	$113\mathrm{dB}$
Fahrt	$3.5 \cdot 10^{-4} \mathrm{W/m^2}$	$50{ m W/m^2}$	$103\mathrm{dB}$

Tabelle 3.2: Globale Dynamik der Bestrahlungsstärken im Fahrzeug

Die globale Dynamik der Bestrahlungsstärke DR_{dB} wird folgendermaßen bestimmt:

$$DR_{\rm dB} := 20 \cdot \log\left(\frac{H_{max}}{H_{min}}\right).$$
 (3.7)



Abbildung 3.11: Messung 1 der globalen Bestrahlungsstärke im Fahrzeug

In verschiedenen Messungen trat die größte Bestrahlungsstärke H_{max} während der Fahrt und im Stand auf und kann mit ca. 50 W/m² nach oben abgeschätzt werden. Damit beträgt die globale Dynamik im vorderen Innenraum maximal 103 dB während der Fahrt und 113 dB im Stand (siehe Tabelle 3.2).

Die niedrigste Bestrahlungsstärke H_{min} wird in Tiefgaragen und im Stand erreicht. Während der Fahrt wird die niedrigste Bestrahlungsstärke H_{min} durch die eigene Beleuchtung im Innenraum derart beeinflußt, daß sie größer ist als die im Stand. Bei diesen niedrigen Bestrahlungsstärken ist es aber nicht möglich, ohne Beleuchtung Bilder aufzunehmen, die einen ausreichenden Signal-zu-Rausch Abstand besitzen. Daher muß spätestens ab einer minimalen Bestrahlungsstärke eine eigene Beleuchtung (siehe Abschnitt 3.6) eingeschaltet werden. Der im Betrieb auftretende minimale Wert H_{min} hängt somit von der Empfindlichkeit des Bildsensors, der Bestrahlungsstärke der eigenen Beleuchtung und der Reflektivität des Innenraums ab.

Da es sich um eine globale Bestrahlungsstärke handelt, aber manche Anwendungen nicht den gesamten Innenraum überwachen müssen, kann es ausreichen, wenn bestimmte Regionen ausgestrahlt werden. Da die Wahl der Regionen von der Anwendung und der Verarbeitung abhängen, wurde an dieser Stelle die globale Bestrahlungsstärke angegeben.

Da ein Bildsensor eine Ortsauflösung besitzt ist neben der globalen Bestrahlungsstärke die lokale Bestrahlungsstärke ein wichtiger Faktor. Diese wird im folgenden Abschnitt beschrieben.

3.3.2 Lokale Dynamik im Fahrzeug

Neben der globalen Dynamik der Bestrahlungsstärke ist für die Bildakquisition die lokale Verteilung der Bestrahlungsstärke im Innenraum sehr interessant. Die lokalen Bestrahlungsstärken beschreiben neben der Dynamik über der Zeit auch eine Dynamik über den Ort. Diese beschreiben die Differenzen der Bestrahlungsstärken, die in einem Bild auftreten können.

Die Meßwerte einer Kamera (Bildsensor) sind Grauwerte, die proportional zu dem durch die Photonen generiertem Strom sind. Zur Umrechnung der Grauwerte in einen Strom gilt in Anlehnung an Gleichung (3.3), daß der Strom

$$I_{Pixel} = g \cdot I_{Pixel,Norm} \tag{3.8}$$

sich multiplikativ aus dem Grauwert der Kamera und einem Faktor $I_{Pixel,Norm}$ zusammensetzt. Setzt man den Strom I_{Pixel} in Gleichung (3.6) als Sensorstrom ein, erhält man die Bestrahlungsstärke der Quelle als Funktion des Grauwerts.

$$H_{e,Quelle} = g \cdot \frac{I_{Pixel,Norm} \cdot \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} H_{e,Norm}(\lambda) \, d\lambda}{A_{Pixel} \cdot \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} H_{e,Norm}(\lambda) \cdot R_{e,Pixel}(\lambda) \, d\lambda}$$
(3.9)

Der Normierungsfaktor $I_{Pixel,Norm}$ wird in einer Referenzmessung mit Hilfe eines Powermeter gemessen, indem man Kamera und Powermeter gleichzeitig der Quelle aussetzt. Durch Gleichsetzen der generierten Ströme, die auf die jeweiligen aktiven Flächen bezogen sind und durch umformen, erhält man den gesuchten Normierungsfaktor.

$$\frac{g_{Ref} \cdot I_{Pixel,Norm}}{A_{Pixel}} = \frac{I_{Sensor,Ref}}{A_{Sensor}}$$
$$I_{Pixel,Norm} = \frac{I_{Sensor,Ref}}{g_{Ref}} \frac{A_{Pixel}}{A_{Sensor}}$$
(3.10)

Der Bildsensor mißt durch das Objektiv auf jedem Bildpunkt eine lokale Bestrahlungsstärke. In erster Näherung kann das Objektiv als eine Sammellinse angenommen werden. In diesem Fall muß die optische Abbildung berücksichtigt werden (siehe Abb. 3.12, [101]).

Um den Zusammenhang zwischen der Bestrahlungsstärke eines Bildpunktes $H'_{e,Pixel}$ und der Bestrahlungsstärke auf dem Objekt $H_{e,Objekt}$ herzuleiten, wird im Gegenstandsbereich begonnen. Alle Angaben beziehen sich auf die in Abb. 3.12 dargestellten Verhältnisse.

Ein Objekt im Gegenstandsbereich wird von einer Quelle bestrahlt. Zur Vereinfachung wird das Objekt als ein Lambert-Strahler angenommen, das mit der Bestrahlungsstärke $H_{e,Objekt}$ diffus in den gesamten Halbraum strahlt. Die Strahldichte dieses Strahlers beträgt:

$$L_{e,Objekt} = \frac{H_{e,Objekt}}{2\pi\Omega_0}.$$
(3.11)



Abbildung 3.12: Abbildung mit einer Sammellinse

Der Strahlungsfluß $\Phi_{e,Objekt}$, der in den Raumwinkel Ω_{Objekt} emittiert wird, ist:

$$\Phi_{e,Objekt} = L_{e,Objekt} \cdot \Omega_{Objekt} \cdot A_{Objekt}.$$
(3.12)

Der Raumwinkel Ω eines Objekts mit der Fläch
eAund dem Abstandrist vereinfacht nach
[14]

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \cdot \Omega_0 \tag{3.13}$$

und wird in der Einheit [sr] gemessen. Somit ist der Raumwinkel des Objekts Ω_{Objekt} :

$$\Omega_{Objekt} = \frac{A_{Linse}}{a^2} \cdot \Omega_0$$

mit $A_{Linse} = \frac{\pi}{4} \cdot D_{Linse}^2$
und $Z_e = \frac{f'}{D_{Linse}}$
 $\Rightarrow \Omega_{Objekt} = \pi \left(\frac{f'}{2aZ_e}\right)^2 \Omega_0.$ (3.14)

 Z_e ist hier die Blendenzahl des Objektivs. Die Fläche des Objekts ist die Fläche, die von der Linse auf ein Pixel abgebildet wird. Mit dem Abbildungsmaßstab β' aus Gleichung (3.15) kann man nach [33] mit der Brennweite f' und dem Abstand a des Objekts zur Linse die Fläche y^2 des Objekts ermitteln (siehe Abb. 3.13).

$$\beta' = \frac{f'}{a+f'}$$

$$\beta' = \frac{y'}{y}$$

$$y = y' \cdot \frac{a+f'}{f'}$$
(3.15)

Setzt man Gleichung (3.14) und Gleichung (3.15) in Gleichung (3.12) ein und berücksichtigt, daß der Strahlungsfluß im Gegenstands- und Bildbereich konstant ist, also $\Phi_{e,Objekt} \equiv \Phi'_{e,Pixel}$ ist, erhält man mit

$$H'_{e,Pixel} = \frac{\Phi'_{e,Pixel}}{A_{Pixel}} \tag{3.16}$$



Abbildung 3.13: Abbildungsmaßstab

und

$$A_{Pixel} = {y'}^2 \tag{3.17}$$

für die Bestrahlungsstärke auf dem Bildpunkt

$$\Phi_{e,Objekt} = L_{e,Objekt} \cdot \pi \left(\frac{f'}{2aZ_e}\right)^2 \Omega_0 \cdot {y'}^2 \left(\frac{a+f'}{f'}\right)^2$$
$$H'_{e,Pixel} = H_{e,Objekt} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{a+f'}{2aZ_e}\right)^2.$$
(3.18)

Ein Objekt, das von einer Quelle bestrahlt wird, reflektiert die Strahlung mit dem Reflexionsfaktor ρ . Die Bestrahlungsstärke der Quelle beträgt somit:

$$H_{e,Quelle} = \frac{H_{e,Objekt}}{\rho}.$$
(3.19)

Mit Gleichung (3.19) und der Tatsache, daß die Bestrahlungsstärke in Gleichung (3.9) $H_{e,Quelle}$ der Bestrahlungsstärke $H'_{e,Pixel}$ in Gleichung (3.18) entspricht, erhält man die gesuchte Bestrahlungsstärke der Quelle.

$$H_{e,Quelle} = H'_{e,Pixel} \cdot \frac{2}{\rho} \cdot \left(\frac{2aZ_e}{a+f'}\right)^2 \tag{3.20}$$

Wobei $H_{e,Quelle}$ bei konstantem ρ nur eine Funktion vom Abstand $a = (\overline{\text{Objekt-Linse}})$ ist und für $f' \ll a$ nicht mehr vom Abstand anhängt. Gleichung (3.20) kann folgendermaßen umgeformt werden:

$$H_{e,Quelle} = H'_{e,Pixel} \cdot \frac{8Z_e^2}{\rho} \cdot \left(\frac{a}{a+f'}\right)^2$$
(3.21)

Die Messungen wurden mit Hilfe einer hochdynamischen CMOS-Kamera im Fahrzeug aufgenommen. Der Aufbau ist in Abb. 3.14 abgebildet. Eine genaue Beschreibung der CMOS-Kamera ist in Abschnitt 3.5 auf Seite 61 zu finden. Die Kamera wurde in Position Nr. 6 eingebaut, um den vorderen Innenraum überwachen zu können.

Für die Messungen wurde der vordere Innenraum in Regionen aufgeteilt, die für die optische Belegungszustandserkennung wichtig sind. In den Regionen Instrumententafel, Fußraum Beifahrer, Sitzfläche Beifahrer, Kopf Beifahrer und Sitzfläche Fahrer, die in Abb. 3.15



Abbildung 3.14: Meßaufbau mit Kamera im Fahrzeug



Abbildung 3.15: Regionen der lokalen Dynamik



Abbildung 3.16: Messung lokaler Maxima

eingezeichnet sind, wurden die maximalen und minimalen Bestrahlungsstärken gemessen. Somit kann eine Aussage über die lokale Dynamik der Bestrahlungsstärken getroffen werden. Gleichzeitig wurden die größten Differenzen zwischen Minimum und Maximum über alle fünf Regionen abgespeichert, um die Dynamik zu bestimmen, die in einem Bild auftreten kann.

Zwei Messungen wurden in den Abbildungen 3.16 und 3.17 beispielhaft dargestellt. Die Messungen wurden mit der hochdynamischen Kamera, zur selben Zeit wie die Messung in Abb. 3.11 aufgenommen. Aufgrund der langen Meßdauer und der vielen Meßreihen sind einzelne Verläufe nicht zu erkennen. Die Abbildungen sollen einen Überblick, über die maximalen und minimalen Bestrahlungsstärken, die meistens in der Region Instrumententafel erreicht wurden, geben. In der Region Instrumententafel war eine Zierleiste aus Metall angebracht, an der es zu starken Reflexionen kam. Zusätzlich können im Instrumententafel Bereich die Sonnenstrahlen direkt in die Kamera reflektiert werden.

Die Werte in Abb. 3.16 sind im Vergleich zu den globalen Bestrahlungsstärken in Abb. 3.11 sehr groß, da sie lokale Bestrahlungsstärken darstellen. Im Mittel betragen die maximalen Bestrahlungsstärken in den jeweiligen Regionen ca. 5 W/m^2 und korrespondieren qualitativ mit den Meßwerten des Powermeters. Die maximale lokale Bestrahlungsstärke $H_{max,lokal}$ wird aus den genannten Gründen aus den Regionen 2-5 ausgewählt. Der Instrumententafel Bereich muß nicht in allen Bildern mit einem hohen Kontrast aufgenommen werden, da die Instrumententafel nicht beweglich ist und eine Verdeckung des Bereiches sehr unwahrscheinlich ist. Reflexionen anderer Objekte, die in den Regionen 2-5 auftreten und $H_{max,lokal}$ überschreiten, sind zwar kritisch, verfälschen aber nicht andere Regionen, wenn eine CMOS-Kamera eingesetzt wird. Solche Fälle müssen dann von der Auswertung erkannt und berücksichtigt werden.

Die gemessenen lokalen Minima sind um zwei Größenordnungen kleiner als die Maxima.



Abbildung 3.17: Messung lokaler Minima

Nr.	Region	Minimum	Maximum	Dynamik
1	I-Tafel Beifahrer	$<2,\!8{\cdot}10^{-4}{ m W}/{ m m}^2$	$110{ m W}/{ m m}^2$	$112\mathrm{dB}$
2	Fußraum Beifahrer	$<2,\!8{\cdot}10^{-4}{ m W}/{ m m}^2$	$15~{ m W/m^2}$	$95\mathrm{dB}$
3	Sitz Beifahrer	$<2,\!8{\cdot}10^{-4}{ m W/m^2}$	$25{ m W/m^2}$	$100\mathrm{dB}$
4	Sitz Fahrer	$<2,\!8{\cdot}10^{-4}{ m W/m^2}$	$25\mathrm{W/m^2}$	$100\mathrm{dB}$
5	Kopf Beifahrer	$<2,\!8{\cdot}10^{-4}{ m W}/{ m m}^2$	$1\mathrm{W/m^2}$	$71 \mathrm{dB}$

Tabelle 3.3: Lokale Dynamik der Bestrahlungsstärken im Fahrzeug

Der Ausreißer um 14:22 Uhr (Abb. 3.17) tritt zufällig durch eine Reflexion auf und ist zeitlich sehr begrenzt. Kritisch sind die unteren Werte bei Sonnenuntergang. Zu diesen Zeitpunkten muß die Beleuchtung der Kamera eingeschaltet werden (siehe Abschnitt 3.6).

Zusammenfassend wurden die lokalen Minima und Maxima aus allen Messungen in Tabelle 3.3 aufgeführt. Die lokale Dynamik, die im Fahrzeug auftreten kann, beträgt somit 110 dB. Diese Dynamik muß aber nicht zwangsläufig zu einem Zeitpunkt auftreten. Die Minima wurden abgeschätzt, da die kleinste Bestrahlungsstärke, die die Kamera messen konnte, $2,8\cdot10^{-4}$ W/m² war. Dieser Wert wird in der Praxis nicht erreicht, da in diesen Fällen eine eigene Beleuchtung hinzu geschaltet wird. Daher wird die minimale Beleuchtungsstärke von der Beleuchtung der Kamera bestimmt. Bei den Messungen ist der Abstand der Beleuchtungsstärke zwischen den Regionen Instrumententafel und Kopf Beifahrer am größten. Eine Kamera sollte in der Lage sein die maximale Dynamik in einem Bild aufnehmen zu können. Wie in Abschnitt 3.6 noch gezeigt wird, ist es in bestimmten Situationen sinnvoll optische Filter einzusetzen. Die Berücksichtigung der optischen Filter wird im folgenden Unterabschnitt erläutert.



Abbildung 3.18: Übertragungsfunktion eines NIR-Interferenzfilters

3.3.3 Einfluß optischer Filter

Wenn z.B. zur Unterdrückung des Tageslichtes ein Nah-Infrarot-Filter verwendet wird, muß man bei der Berechnung der Beleuchtungsstärke die Übertragungsfunktion $F(\lambda)$ des Filters berücksichtigen. Die Abb. 3.18 zeigt die Übertragungsfunktion eines Interferenzfilters, das nur einen sehr schmalen Bereich im Nah-Infrarot-Bereich durchläßt.

Erweitert man die Gleichung (3.3) mit der Übertragungsfunktion des Filters zu

$$H_{e,Quelle}(\lambda) = k \cdot F_e(\lambda) \cdot H_{e,Norm}(\lambda).$$
(3.22)

so wird Gleichung (3.6) zu:

$$H_{e,Quelle} = I_{Sensor} \cdot \frac{\int\limits_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} F_e(\lambda) \cdot H_{e,Norm}(\lambda) \, d\lambda}{A_{Sensor} \cdot \int\limits_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} F_e(\lambda) \cdot H_{e,Norm}(\lambda) \cdot R_{e,Sensor}(\lambda) \, d\lambda}$$
(3.23)

und aus Gleichung (3.9) wird

$$H_{e,Objekt} = g \cdot \frac{I_{Pixel,Norm} \cdot \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} F_e(\lambda) \cdot H_{e,Norm}(\lambda) \, d\lambda}{A_{Pixel} \cdot \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} F_e(\lambda) \cdot H_{e,Norm}(\lambda) \cdot R_{e,Pixel}(\lambda) \, d\lambda},$$
(3.24)

die in Gleichung (3.21) eingesetzt wird, wenn ein Objektiv benutzt wurde.



Abbildung 3.19: Messung Powermeter mit NIR-Interferenzfilter

Die Messung in Abb. 3.19 wurde mit einem Powermeter und dem Interferenzfilter aus Abb. 3.18 aufgenommen. Sie zeigt eine Stadtfahrt durch München bei sonnigem Wetter ohne Wolken mit zwei Tunneln auf der Strecke. Der Sensor war wie bei den vorangegangenen Messungen in Position Nr. 6 montiert. Um ca. 15:30 Uhr wurde gedreht und die Strecke zurückgefahren, so daß insgesamt 4 Tunnel-Fahrten gemessen wurden. Die Bestrahlungsstärken vor den ersten beiden Tunnel-Fahrten und die nach den letzten beiden Tunnel-Fahrten wurden also auf derselben Strecke nur mit umgekehrter Fahrtrichtung aufgenommen. Die Lage des Fahrzeugs zur Sonne variiert die globale Bestrahlungsstärke um den Faktor 3.

Absolut gesehen sind die Meßwerte mit Interferenzfilter im Vergleich zu den Meßwerten in Abb. 3.11 ohne Interferenzfilter um 2 Größenordnungen kleiner. Die Tunnel-Fahrten zeigen, daß in diesem Wellenlängenbereich keine Anteile durch die Tunnel-Beleuchtung eingestrahlt werden.

In Abb. 3.20 ist eine interessante Messung einer Crash-Anlage abgebildet. In dieser Messung ging es um die Bestimmung der maximalen globalen Bestrahlungsstärken bei Crash-Bedingungen, da eine OBE bei diesen Bedingungen getestet wird. Die Beleuchtung wurde um 10:42 Uhr eingeschaltet. Vor diesem Zeitpunkt sind die Anteile der Raum-Beleuchtung zu sehen, die Werte um $2 \, m W/m^2$ besitzen. Der maximale Wert von $0.058 \, W/m^2$ ist im Vergleich zu den Messungen mit Sonnenbestrahlung um den Faktor 2 kleiner. Hierzu muß erwähnt werden, daß die Beleuchtung der Crash-Anlage ein Spektrum besitzt, das der Sonnen sehr ähnlich ist. Die Crash-Beleuchtung stellt bezogen auf das normale Sonnenlicht, wie die Messung gezeigt hat, keine kritische Situation dar.

Für den optischen Innenraumschutz ist die Untersuchung eines Tag-Nacht-Zyklus, wie er in 3.21 abgebildet ist, interessant. Die Messung wurde um 16:30 Uhr bei sonnigem Wetter ohne Wolken begonnen. Der Sensor wurde in Position Nr. 6 befestigt. Die ersten ausgeprägten Minima wurden durch die Schatten von Bäumen erzeugt, die durch die



Abbildung 3.20: Messung Powermeter mit Crash-Beleuchtung



Abbildung 3.21: Messung Powermeter Tag-Nacht-Zyklus

Wanderung der Sonne zeitweise den Innenraum überdeckten. Gegen 21:00 Uhr wurde es merklich dunkler und der Sonnenuntergang ist zu erkennen. Die Sonne ging um 6:00 Uhr am folgenden Tag wieder auf. Die Bestrahlungsstärke während der Nacht beträgt im Mittel $1 nW/m^2$. Mit dem maximalen Wert von ca. 2,5 bis $3 W/m^2$ beträgt die globale Dynamik im Stand und während der Fahrt ca 190 dB. Dieser Wert wird nur bei Benutzung des Interferenz-Filters erreicht. Der minimale Wert wird um die Bestrahlungsstärke der Beleuchtung der Kamera erhöht, dadurch ist die Dynamik, die die Kamera aufnehmen sollte, wesentlich niedriger.

3.4 Vergleich der CMOS- und CCD-Technologie

Die zur Zeit verfügbaren Technologien der Halbleiter Bildsensorik sind die CMOS- (*Complementary Metal Oxid Semiconductor*) und die CCD-Technologie (*Charged Coupled Devices*). Um für die geplanten Anwendungen die beste Technologie auszuwählen, wird in diesem Abschnitt ein kurzer Vergleich gegeben (siehe [63]).

Die CCD-Technologie wurde Ende der Sechziger Jahre in den Bell Labs [6] als Speicher entdeckt [9], der analoge Werte in Form von Ladungen (Elektronen oder Löcher) speichert. Durch diese Eigenschaft, konnten CCDs zu analogen Verzögerungsschaltungen, programmierbaren Filtern und Bildsensoren eingesetzt werden. Durch die Entwicklung digitaler Schaltungen, wie z.B. digitalen Filtern oder Speichern (*Random Access Memory*), wurde die CCD-Technologie sehr schnell aus diesen Anwendungsbereichen verdrängt. Als Bildsensor eignete sie sich schon damals hervorragend und konnte sich bis heute als Stand der Technik etablieren. Ein CCD-Bildsensor besteht aus einem MOS-Kondensator (*Metal Oxid Semiconductor*) der in Inversion betrieben wird (siehe Abb. 3.22). In diesem Zustand ist es möglich, die durch Photonen optisch generierten Ladungsträger in der Raumladungszone zu sammeln und zu transportieren.

Grundsätzlich existieren zwei unterschiedliche Arten von CCD-Bildsensorarrays: Frame-Transfer und Interline-Transfer [95]. Die in dieser Arbeit beschriebenen Eigenschaften gelten allgemein für beide Arten. Aus diesem Grund beziehen sich die weiteren Beschreibungen auf Interline-Transfer CCDs. Bei einem Interline-Transfer CCD besteht ein Bildpunkt aus zwei MOS-Kondensatoren, wobei einer optisch abgedeckt ist und für den Abtransport der optisch generierten Ladung zuständig ist. In Abb. 3.23 ist beispielhaft für einen Interline-Transfer CCD-Bildsensor der schematische Aufbau aus lichtempfindlichen MOS-Kondensatoren und vertikalen bzw. horizontalen Schieberegistern dargestellt. Bei dieser Art der Auslese muß das horizontale Schieberegister innerhalb eines Takts des vertikalen Schieberegisters die Ladungen einer gesamten Zeile aus dem Array schieben [95]. In den Schieberegistern werden die Ladungen von einem Nachbarn zum anderen verschoben, wobei durch Steuerleitungen die MOS-Kondensatoren derart in Inversion versetzt werden, daß die Ladung zum jeweiligen Nachbarn fließt (siehe Abb. 3.24). Je nach Steuerung werden unterschiedlich viele Phasen zum Transport der Ladung benötigt. In Abb. 3.24 sind es drei Phasen.

Die erste Kamera, die auf einen Halbleiter basierte, wurde 1970 vorgestellt. 1975 erreichten die CCD-Sensoren die notwendige optische Auflösung, um die herkömmlichen Kameras zu ersetzen. Die CCD-Technologie wurde seit ihrer Einführung ständig weiterentwickelt



Abbildung 3.22: MOS-Kondensator in Inversion



Abbildung 3.23: Aufbau eines CCD-Bildsensors



Abbildung 3.24: Transportmechanismus eines CCD Elements

und besitzt heute folgende Vorteile:

- Stand der Technik
- Preisgünstig durch hohe Stückzahlen
- Hohe Auflösung größer $2048 \ast 2048$
- Pixelgröße ca. $5\,\mu{\rm m}$
- Hohe Empfindlichkeit
- Hohe Pixelhomogenität (niedriges *Fixed-Pattern-Noise* (FPN))

Neben den aufgeführten Vorteilen existieren aber auch Nachteile, die einerseits von der Technologie bedingt sind und andererseits durch die Funktionsweise verursacht werden:

- geringer Temperaturbereich (max. 55° C)
- niedrige Dynamik
- Blooming
- Smearing
- teurer als CMOS-Technologie, da hochspezialisiert
- keine On-Chip Elektronik



Abbildung 3.25: Smearing und Blooming eines CCD-Sensors

Steigt die Umgebungstemperatur, werden mehr Ladungsträger thermisch generiert. Hierbei hat sich gezeigt, daß die Bilder von CCD-Sensor-Arrays schon bei wenig erhöhten Temperaturen einen nicht akzeptablen Signal-zu-Rausch-Abstand erreichen. Die Dynamik, die bei herkömmlichen CCD-Sensoren nicht sehr groß ist, kann durch den Einsatz von elektronischen oder mechanischen Shuttern erweitert werden.

Blooming tritt auf, wenn in einem Bildbereich so viele Ladungsträger generiert werden, daß diese in andere Bildpunkte überlaufen. Es breitet sich um die helle Region gleichmäßig aus. Smearing tritt einerseits durch Photonen auf, die durch Streuung oder Reflexion in die vertikalen Schieberegister gelangen und andererseits durch Elektronen, die in die Schieberegister gestreut werden. Es macht sich als vertikaler heller Balken von der ersten bis zur letzten Zeile bemerkbar. In den meisten Fällen treten Blooming und Smearing gleichzeitig auf. Beide Artefakte führen zu einer falschen Darstellung der Bildregionen und somit auch zu Fehlinterpretationen bei der Bildverarbeitung. Um diese Artefakte zu verhindern, wurden unterschiedliche Lösungen entwickelt (siehe [95]).

In Abb. 3.25 sind die Effekte Smearing und Blooming bildhaft dargestellt. Die linke Abbildung zeigt eine Taschenlampe auf einem Stuhl vor einer Fensterfront. Die rechte Abbildung zeigt dieselbe Anordnung, wobei die Taschenlampe eingeschaltet ist. Das Smearing ist in den Spalten um die Taschenlampe verbreitet. Das Blooming breitet sich kreisförmig um die Taschenlampe auch in den Zeilen aus.

Der erste Halbleiter Bildsensor, der auf einer Photodiode in MOS-Technologie basierte, wurde noch vor dem CCD-Bildsensor 1968 vorgestellt [63]. Das Prinzip war, photogenerierte Ladungsträger auf einer Sperrschichtkapazität zu sammeln. Diesem Prinzip ist man bei den heutigen CMOS-Bildsensoren treu geblieben. In Abb. 3.26 sind die zwei möglichen CMOS-Bildsensoren skizziert. Zur Zeit wird hauptsächlich die Photodiode eingesetzt. Durch den Einsatz der CMOS-Technologie ergeben sich Vorteile, die hier kurz beschrieben sind:

- Standard CMOS-Technologie
- Wahlfreier Zugriff auf jeden Bildpunkt
- Logarithmische oder lineare Kennlinien



Abbildung 3.26: Aufbau von CMOS-Bildsensoren



Abbildung 3.27: Vergleich zu Abb. 3.25

- Hohe Empfindlichkeit
- Große Dynamik (bis 140 dB)
- Variable Pixelgeometrie und Pixelanordnung
- Niedrige Versorgungsspannung und geringer Leistungsverbrauch
- Elektronischer Shutter (global oder lokal)
- Weiter Temperaturbereich (bis 125° C)
- Kein Blooming
- Kein Smearing
- Kein Time Lag
- On-Chip Signalverarbeitung und Peripherieelektronik (analog / digital)

Zum Vergleich zwischen den beiden Technologien wurde in Abb. 3.27 die gleiche Szene, wie in Abb. 3.25 mit einer CMOS-Kamera von IVP (siehe Seite 64) aufgenommen. Das rechte Bild zeigt so gut wie kein Smearing oder Blooming.

Da die CMOS-Bildsensoren in der CMOS-Standard-Technologie hergestellt werden, sind die Herstellungskosten für CMOS-Sensor-Arrays bei gleichen Stückzahlen niedriger als die der CCD-Technologie. Ein weiterer Preisvorteil liegt in der Integrierbarkeit von Peripherieelektronik, wie Schaltungen zur Temperaturkompensation, Rauschunterdrückung, Erhöhung der Ansprechgeschwindigkeit, Analog-Digital-Wandlung, Speicherung der Sensorwerte, Kalibration und Verstärkung. Durch die Signalverarbeitung ist es möglich, das Sensorverhalten den Anforderungen anzupassen und zusätzlich eine Signalauswertung vorzunehmen. Es ist somit möglich eine lokale Helligkeitsadaption, Differenzbildung aufeinanderfolgender Bilder oder andere Signalverarbeitungsalgorithmen zu implementieren. Da die CMOS-Technologie ständig weiter entwickelt wird und dadurch die Strukturgrößen und der Energieverbrauch sinken, ist auch der Energiebedarf eines CMOS-Sensor-Arrays wesentlich geringer.

Ein Nachteil der CMOS-Technologie ist die höhere Pixelinhomogenität, die zu einem ortsfesten Rauschen führt, das *Fixed-Pattern-Noise* (FPN) genannt wird. Ein zusätzliches ortsfestes Rauschen wird auch durch Auslese- und Verstärkerschaltungen eingeführt. Ein Großteil des FPN kann schon durch das Layout des Bildpunktes und des Sensor-Arrays vermindert werden. Mit relativ einfachen Operationen kann der Rest des FPN, z.B. durch *Correlated Double Sampling* (CDS) [78] [95], entfernt werden. Da die Möglichkeit besteht, Schaltungen mit auf dem Sensor-Array zu integrieren, sind Schaltungen zur Reduktion des FPN, wie CDS, auf dem Sensor denkbar. Um einen Vergleich zwischen der CCD- und CMOS-Technologie zu ziehen, wurden die wichtigsten Eigenschaften beider Technologien in der Tabelle 3.4 zusammengefaßt.

Eigenschaft	CCD-Bildsensor	CMOS-Photodiode	
Photoempfindlichkeit	$pprox 0,3\mathrm{A/W}$	$pprox 0,3\mathrm{A/W}$	
Dynamikbereich	60-80 dB (linear) mit elektr. Shutter	60-80 dB (linear) ohne elektr. Shutter; bis 140 dB logarithmisch oder mit elektr. Shutter	
Temperaturbereich	bis 55° C	bis $125^{\circ} \mathrm{C}$	

Tabelle 3.4: CCD- vs. CMOS-Bildsensor

Legt man nur den Temperaturbereich für die Einsetzbarkeit der Sensoren im Fahrzeug zugrunde, sind die CCD-Sensoren nicht geeignet. Berücksichtigt man noch den Dynamikbereich und die genannten Vorteile der CMOS-Technologie, so fällt die Entscheidung eindeutig für die CMOS-Sensoren. Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die CMOS-Bildsensoren die CCD-Bildsensoren zuerst im Consumer-Bereich aufgrund der geringeren Produktionskosten ersetzen werden. In der weiteren Entwicklung werden die CMOS-Bildsensoren auch in der optischen Meßtechnik Einzug halten. Um Bildverarbeitung auch im Außenbereich zu ermöglichen, wird es unumgänglich sein, Bildsensoren zu verwenden, deren Eigenschaften denen der CMOS-Bildsensoren entsprechen.

Im folgenden Abschnitt werden verschiedene CMOS-Sensor-Arrays beschrieben, die sich durch den Aufbau der Sensoren unterscheiden und in dieser Arbeit zur Aufnahme im



Abbildung 3.28: Pixelstruktur des logarithmischen Pixels

Fahrzeug eingesetzt wurden. Einige Kameras konnten aufgrund der geringen Verfügbarkeit nur im Labor getestet werden.

3.5 CMOS-Kameras

Da die Anforderungen an eine CMOS-Kamera für die Anwendungen im Fahrzeug nicht zu Beginn der Arbeit feststanden und die Entwicklung der Sensoren nicht nur durch dieses Projekt angetrieben wurden, mußten unterschiedliche CMOS-Kameras für den Einsatz im Fahrzeug angepaßt und getestet werden. Daher wurden bei den jeweiligen Kameras unterschiedliche Eigenschaften untersucht, um die Spezifikation für eine *ideale* Kamera aufzustellen.

Aufgrund der Verfügbarkeit und des großen Dynamikbereichs wurde im Rahmen dieser Arbeit zunächst eine Kamera mit einem CMOS-Sensor-Array eingesetzt, das aus 128×128 Pixel in hexagonaler Anordnung bestand. Der Schaltplan eines Bildpunktes ist in Abb. 3.28 dargestellt. Die auf die Photodiode einfallenden Photonen werden in eine Spannung umgewandelt und können über die Selektionsleitung adressiert und ausgelesen werden. Der Vorteil des logarithmischen Bildsensors liegt neben dem großen Dynamikbereich von 140 dB und der wahlfreien Adressierbarkeit in der hohen Ausleserate von bis zu 3 MHz (siehe [36]).

Ursprünglich sollte diese Kamera zur Überwachung von Räumen, welche der Kfz-Innenraumüberwachung in einigen Anwendungen ähnlich ist, eingesetzt werden. Zu diesem Zweck wurde das Sensor Array in ein Multifunktionsmodul (MFM) integriert (siehe Abbildung 3.30 a) und b)). Das Konzept des Multifunktionsmoduls wurde für integrierte



Abbildung 3.29: Kennlinie des logarithmischen Pixels



Abbildung 3.30: MFM-Kamera mit log. CMOS-Sensor-Array

Haussysteme im IHS-ReWo Projekt, einer Initiative der Fraunhofer-Gesellschaft [26], entworfen. Es besteht im wesentlichen aus einem Basismodul und diversen Schnittstellenmodulen, wie z.B. ISDN-, Analogmodem, Ethernet/TCP-IP-, CAN- [22] und IrDA-Modulen. Das Basismodul (Abb. 3.30 c)) enthält einen Microcontroller (μ C Motorola 68332 [56,57]), bis zu 2 MByte Hauptspeicher, eine Echtzeituhr und einem Interface zu den anderen Modulen. Als Betriebssystem wird VxWorks von Wind River [103] eingesetzt. Das Basismodul hat die Aufgabe, das CMOS-Sensor-Array auszulesen und die Bilddaten über die PCMCIA Ethernet Card (Abb. 3.30 d)) im Netzwerk zur Verfügung zu stellen. Das Modul-Konzept dieser Kamera erlaubt es, beliebige Sensor-Arrays zu einem Kamerasystem zusammenzusetzen. Je nach Sensor-Array ist es notwendig, ein eigenes Sensormodul zu entwickeln [77]. Zu dieser MFM-Kamera wurde ein Programm im Rahmen einer Diplomarbeit [29] entwickelt mit der es möglich ist, die Kamera von jedem Netzwerk-Rechner anzusprechen. Bei Anforderung wird ein Bild eingelesen und per FTP (*File Transfer Protocol*) an den Netzwerk-Rechner verschickt.



Abbildung 3.31: FPN der MFM-Kamera



Abbildung 3.32: Pixelstruktur des linearen Pixels

Bei diesem Sensor treten zwei Eigenschaften besonders negativ hervor. Das *Fixed-Pattern-Noise* ist aufgrund der Pixelinhomogenität sehr hoch und der Kontrast in den Bildern sehr niedrig. Diese Effekte sind in den Beispielbildern Abb. 3.31 gut zu erkennen. Der niedrige Kontrast wird durch die logarithmische Kennlinie und den dynamischen Bereich des Sensors verursacht. Mit Hilfe von Messungen kann das FPN des jeweiligen Sensor-Arrays aufgenommen und bei der eigentlichen Aufnahme einfach entfernt werden. Bei niedrigen Beleuchtungsstärken ist der Kontrast hoch und nimmt zu hohen Beleuchtungsstärken logarithmisch ab. Durch diese Eigenschaft, die systembedingt ist, ist der Sensor für Anwendungen, die auf Bildverarbeitung basieren, nicht geeignet. Aus diesem Grund wurde die MFM-Kamera nach den ersten Tests im Labor im Versuchsträger nicht eingesetzt.

Für die BMW AG wurde am Fraunhofer IMS eine hochdynamische Kamera entwickelt, die im Gegensatz zur MFM-Kamera einen Pixel (Abb. 3.32) mit linearer Charakteristik (Abb. 3.33) benutzt [78]. Um einen dynamischen Bereich von ca. 120 dB zu erreichen, wird



Abbildung 3.33: Kennlinie der hochdynamischen Kamera bei einer Integrationszeit und drei Verstärkungsfaktoren bei $\lambda = 630 n$ m



Abbildung 3.34: Kennlinien der hochdynamischen Kamera bei vier Integrationszeiten und drei Verstärkungsfaktoren bei $\lambda = 630 n$ m

jedes Pixel mit vier unterschiedlich langen Integrationszeiten ausgelesen. Hinzu kommen noch – je nach Ausgangspegel – drei Verstärkungsfaktoren. In Abb. 3.33 ist die Kennlinie für eine Integrationszeit mit drei Verstärkungsfaktoren (7;2,8;1)) dargestellt. Mit einer Integrationszeit wird eine Dynamik von 71 dB erreicht. Nimmt man noch drei Integrationszeiten hinzu, dann sieht die normierte Kennlinie wie in Abb. 3.34 gezeigt aus.

Die hochdynamische Kamera wurde ebenfalls in der Modul-Bauweise, wie die MFM-Kamera entworfen, so daß diese an die Interface-Module anschließbar ist (Abb. 3.35). Um beim Einlesen der Bilder in einen Rechner eine möglichst hohe Bildrate zu erzielen, wurde eigens ein RS422 Schnittstellen-Modul entwickelt. Die hochdynamische Kamera erreicht eine Bildrate von 50 Bilder/s, wobei sie 200 Bilder/s intern aufnimmt. Aufgrund des weiten dynamischen Bereichs, werden die Pixelwerte mit 20 Bit abgespeichert.

Die Verarbeitung der Grauwerte mit 20 Bit pro Pixel unterscheidet sich nicht von der Verarbeitung mit 8 Bit. Einen Unterschied gibt es bei der Darstellung der hochdynamischen Bilder, da die Ausgabegeräte, wie z.B. Monitor und Drucker, diese Dynamik nicht darstellen können. Um trotzdem die Leistungsfähigkeit der Kamera darstellen zu können,



Abbildung 3.35: Hochdynamische Kamera



Abbildung 3.36: Aufnahme der hochdynamischen Kamera

werden die Bilder lokal verarbeitet. In Abb. 3.36 ist eine typische Szene in einer Verkehrsaufnahme dargestellt, die bei Fahrerassistenzsystemen auftreten. Die Kamera ist in der Höhe des Innenspiegels auf der Beifahrerseite montiert und erfaßt die Fahrbahn vor dem Fahrzeug. Das Fahrzeug befand sich zur Zeit der Aufnahme in einem Tunnel und fuhr auf das Ende zu. Um den vollen Dynamikbereich darstellen zu können, wurde das linke Bild in Abb. 3.36 lokal adaptiert. Im rechten Bild in Abb. 3.36 werden von den 20 zur Verfügung stehenden Bits nur 8 Bit pro Pixel dargestellt. Diese Darstellung entspricht der Dynamik einer herkömmlichen CCD-Kamera, wobei aber keine Effekte wie Blooming oder Smearing auftreten.

Wie in Abb. 3.36 können bei Aufnahmen im Fahrzeug Situationen entstehen, in der die Kamera in der Lage sein muß, entweder global die gesamte Dynamik der Szene aufzunehmen oder sich lokal anzupassen. Setzt man die Position 6 und 5 aus Abschnitt 3.2 Abb. 3.1 voraus, kann man davon ausgehen, daß es bei den Anwendungen optische Belegungszustandserkennung und optischer Innenraumschutz zu keiner direkten Einstrahlung in die Kamera kommen wird. Unter dieser Voraussetzung sind die Anforderungen bezüg-



Abbildung 3.37: Pixelstruktur des HFR-Pixels

lich der Dynamik niedriger.

Eine andere CMOS-Kamera, die speziell für hohe Bildraten entwickelt wurde [87], konnte für Tests mit der Nah-Infrarot (NIR) Bildaufnahme (Abschnitt 3.6) eingesetzt werden. Sie ist in der Lage bis zu 1000 Bilder/s mit einem einstellbaren globalen und synchronen Shutter aufzunehmen. Die Möglichkeit extrem kurze Integrationszeiten zu realisieren, macht die High-Frame-Rate (HFR) Kamera ideal für alle Aufnahmen, die mit eigener Beleuchtung arbeiten, um u.a. externe Beleuchtungseinflüsse zu unterdrücken. Für die 3D-Kamera in [51] wurde diese Kamera verwendet, da sie in der Lage ist, Integrationszeiten von bis zu 30 ns einzustellen. Die Pixelstruktur ist in Abb. 3.37 und die Kamera in Abb. 3.39 abgebildet.

Die Kennlinien der HFR-Kamera in Abb. 3.38 zeigen, daß es sich um lineare Pixel handelt. Mittels der Integrationszeiten kann die globale Dynamik über große Bereiche eingestellt werden.

Eine weitere Kamera ist die Smart-Camera von Integrated Vision Products (IVP [37]). Die Besonderheiten dieser Kamera sind die lineare Kennlinie Abb. 3.40, ein A/D-Wandler und eine Verarbeitungseinheit für jede Spalte On-Chip. Durch diese Integration eignet sich die Kamera sehr gut für die industrielle Bildverarbeitung, in der mit einem Befehl eine gesamte Zeile abgearbeitet werden kann (Lichtschnittverfahren). In [35] wurde die Kamera untersucht, ob sie für den optischen Innenraumschutz geeignet ist. Ein großer Nachteil war, daß die Kamera keinen eigenen Programmspeicher besitzt und somit trotz der Verarbeitungseinheit von einem anderen Rechner mit Befehlen versorgt werden mußte. Die Kennlinie in Abb. 3.40 wurde von Huber in [35] gemessen, wobei nur auf die Grauwerte zugegriffen werden konnte, da kein direkter Ausgang erreichbar war. Die Integrationszeit wurde global über einen Rolling-Shutter eingestellt, da der Bildsensor über keinen synchronen Shutter verfügt. Die Integrationszeit bei einem Rolling-Shutter wird über die Anzahl der Zeilen eingestellt, die vor dem Auslesen zum Integrieren geschaltet werden,



Abbildung 3.38: Kennlinie der HFR-Kamera



Abbildung 3.39: HFR-Kamera



Abbildung 3.40: Kennlinie der IVP-Smart-Camera

da für die Auslese und die Aktivierung zur Integration jeder Zeile eine gewisse Zeit benötigt wird. Die maximale Integrationszeit entspricht somit der Anzahl der Zeilen des Bildsensors. In dem Fall der Smart-Camera waren das 255 Zeilen. Eine Aufnahme der Kamera zeigt die Abb. 3.42. Die Aufnahmen haben gezeigt, daß die Smart-Kamera von IVP derzeit noch nicht für einen Einsatz im Fahrzeug geeignet ist, sondern erst dann, wenn es möglich ist, ein Programm selbständig auf der Kamera abarbeiten zu lassen.

Neben den hier vorgestellten Kameras wurden noch andere CMOS- und CCD-Kameras beobachtet, die aber entweder für Testzwecke nicht zur Verfügung standen, oder wegen einer technischen Einschränkung (schlechte Bildqualität, Temperaturbereich), nicht eingesetzt werden konnten. Durch den wachsenden Markt haben im Laufe der Arbeit einige große Bildsensor-Hersteller, die bisher vornehmlich CCD-Bildsensoren hergestellt haben, erklärt, in Zukunft auch CMOS-Bildsensoren zu entwickeln. Dazu zählen Infineon (ehemals Bereich Halbleiter von Siemens), Philips und Panasonic. Der von den *Global Playern* angestrebte Markt ist zuerst der Consumer Markt, der die höchsten Stückzahlen verspricht. Es ist aber wahrscheinlich, daß sie auch für den Automobilbereich entwickeln werden, wenn die ersten Kamera-Systeme im Auto eingebaut werden und somit auch die Stückzahlen in interessante Bereiche gelangen.

3.6 NIR-Bildaufnahme

In der Bildverarbeitung werden Bewegungen von Objekten durch Änderungen der Grauwerte lokalisiert. Die Verfahren müssen dabei berücksichtigen, daß eine Änderung der Grauwerte nicht nur durch eine Bewegung eines Objektes, also durch eine Änderung des Reflexionsfaktors, verursacht werden können. Die Grauwerte können auch durch Beleuchtungsänderungen, die entweder durch eine Änderung der Bestrahlungsquelle selbst



Abbildung 3.41: Kamera von IVP



Abbildung 3.42: IVP-Smart-Camera

oder durch einen Schatten erzeugt werden, verändert werden. Obwohl eine Beleuchtungsänderung nicht den Bildinhalt ändert, sondern eine Verschiebung der Grauwerte verursacht, setzt die Erkennung der Beleuchtungsänderung eine Interpretation des Eingangsbildes voraus. Eine Bildverarbeitung, die die Veränderungen der Grauwerte detektieren will, die durch Bewegungen von Objekten erzeugt werden, muß aber in der Lage, diese von solchen Beleuchtungsänderungen zu unterscheiden.

Grundsätzlich existieren zwei Ansätze, Beleuchtungsänderungen von der inhaltlichen Änderung zu unterscheiden. Der erste ist der Einsatz von Bildverarbeitungs-Algorithmen, die versuchen die charakteristischen Eigenschaften von Beleuchtungsänderungen zu lokalisieren. Ein anderer Ansatz setzt wesentlich früher an, nämlich bei der Aufnahme der Bilder. Mit Hilfe einer Lichtquelle wird versucht, den Einfluß der störenden Lichtquellen zu eliminieren.

Folgende Gründe haben zur Entwicklung der Nah-Infrarot (NIR) Bildaufnahme im Bereich von 780 nm bis 950 nm geführt:

- Unterdrückung störender Beleuchtungsänderungen Die Beleuchtungsänderungen können nicht ohne weiteres von Änderungen, die von Objekten erzeugt werden, unterschieden werden. Der Aufwand der algorithmischen Unterscheidung, die nicht in allen Fällen funktioniert, ist extrem hoch.
- Beleuchtung des Innenraums bei Dunkelheit

Um eine korrekte Auswertung der Bilder zu gewährleisten, müssen die Bilder, die von der Kamera geliefert werden, einen minimalen Kontrast enthalten. Dieser wird dann erreicht, wenn die minimale Bestrahlungsstärke der Kamera $H_{min,K}$ um $H_{min,V}$ kleiner als die minimale Bestrahlungsstärke der Szene $H_{min,S}$ ist. $H_{min,V}$ ist dabei die minimale Bestrahlungsstärke die benötigt wird, um den geforderten Kontrast zu erzielen. Geht man von einem Sensor mit linearer Kennlinie aus, dessen gesamter Dynamik Bereich auf N Bit abgebildet wird, so berechnet sich $H_{min,V}$ nach

$$H_{min,V} = \left(\frac{H_{max,K} - H_{min,K}}{2^N}\right) \cdot 2^n, \qquad (3.25)$$

wobei n die Anzahl der Bit ist, die nötig ist um den minimalen Kontrast zu erzielen. Eine eigene Beleuchtung ist also dann notwendig, wenn die Bedingung

$$H_{\min,K} + H_{\min,V} \le H_{\min,S} \tag{3.26}$$

von der Kamera nicht erfüllt wird. In diesem Fall muß mit der minimalen Bestrahlungsstärke $H_{min,Q}$ die Szene beleuchtet werden. Die Bedingung 3.26 erweitert sich somit zu

$$H_{min,K} + H_{min,V} \le H_{min,S} + H_{min,Q}.$$
 (3.27)

Mit Gleichung (3.25) bestimmt sich $H_{min,Q}$ dann zu

$$H_{\min,Q} \ge H_{\min,K} + \left(\frac{H_{\max,K} - H_{\min,K}}{2^N}\right) \cdot 2^n - H_{\min,S}.$$
(3.28)

Wird eine Quelle zur Beleuchtung der Szene eingesetzt, muß sichergestellt sein, daß

$$H_{max,K} \ge H_{max,S} + H_{min,Q}. \tag{3.29}$$

ist, damit durch die Beleuchtung der eigenen Quellen keine Sättigung im Bildsensor erzeugt wird. Nimmt man z.B. die hochdynamische Kamera, die nach Abb. 3.34 eine minimale und maximale Bestrahlungsstärke von $H_{min,K} = 0.28 \text{ mW/m}^2$, $H_{max,K} =$ 330 W/m^2 bei einer Wellenlänge $\lambda = 630 \text{ nm}$ messen kann, beträgt $H_{min,V} = 81 \text{ mW}$ bei n = 8 Bit. Mit $H_{min,S} = 1 \, n W/m^2$ (aus Abb. 3.21 Seite 52) ist die Bedingung 3.26 nicht erfüllt und eine eigene Beleuchtung ist zwingend notwendig. Mit Gleichung (3.28) ergibt sich für die Bestrahlungsstärke der eigenen Beleuchtung ein Wert von $H_{min,Q} = 81 \, m W/m^2$. Bei diesem Wert muß berücksichtigt werden, daß es sich um die Bestrahlungsstärke handelt, die auf dem Sensor gemessen wird. Die Bestrahlungsstärke, die von einer Quelle abgestrahlt werden muß, hängt von vielen Faktoren, wie z.B. dem Reflexionsfaktor, der Entfernung und der Optik ab. Mit $H_{min,Q} = H'_{e,Pixel}$ aus Abschnitt 3.3.2 auf Seite 46 und Gleichung (3.21) ergibt sich mit n = 8 Bit, $\rho = 0.01$ (schwarzer Samt), a = 1 m, f' = 2.2 m m und $Z_e = 2,0$ für die Bestrahlungsstärke der Quelle ein Wert von $H_{e,Quelle} = 258 \text{ W/m}^2$ bei $\lambda = 630 \, n \text{m}$. Bei einer Wellenlänge von $\lambda = 900 \, n \text{m}$ erhöht sich der Wert für $H_{e,Quelle}$ um den Faktor 0,4 (siehe Abb. 3.43) auf $H_{e,Quelle} = 645 \,\mathrm{W/m^2}$. Für n = 5 Bit beträgt die Bestrahlungsstärke $H_{e,Quelle} = 80 \text{ W/m}^2$ ($\lambda = 900 \text{ nm}$). Dieser Wert ist immer noch sehr hoch, doch zählt bei einem System nicht die Leistung, sondern der Energieverbrauch, der von der Belichtungszeit und der Bildrate abhängt. Geht man von einer zu beobachtenden Fläche von ca. 2 m², einer Bildrate von 7,5 Hz und einer Integrationszeit von 27 μ s aus, so ergibt sich für den Energieverbrauch bei n = 5 Bit und $\lambda = 900 n$ m ein Wert von 32.4 mWs.

• unsichtbar für das menschliche Auge

Eine Quelle, die für das menschliche Auge sichtbar wäre, wäre nicht nur sehr störend, sondern sie würde im Fall des Innenraumschutzes auch jedem zeigen, wann der Innenraumschutz ein- bzw. ausgeschaltet ist. Quellen mit einer Wellenlänge oberhalb von 780 nm sind für das menschliche Auge nicht sichtbar.

• Empfindlichkeit der Bildsensoren

Die Quellen der eigenen Beleuchtung müssen in einem Wellenlängen-Bereich strahlen, in dem die Bildsensoren empfindlich sind. Obwohl diese ihre maximale Empfindlichkeit bei ca. 650 nm haben, fällt die Empfindlichkeit zu größeren Wellenlängen stark ab, so daß bei 900 nm die Empfindlichkeit nur noch ca. 30 % der maximalen Empfindlichkeit beträgt. Wie die Messungen in den vorherigen Abschnitten gezeigt haben, ist diese Empfindlichkeit ausreichend.

• Minima im Sonnenspektrum

Da die Sonne bei den Anwendungen im Fahrzeug die Hauptquelle ist, ist es von Vorteil, in einem spektralen Bereich zu arbeiten, in dem die spektrale Leistung auf der Erdoberfläche der Sonne klein ist. Je geringer die Intensitäten der Sonne sind, desto geringer muß die Intensität der Beleuchtung der Kamera sein. Wie die Abb. 3.9 auf Seite 41 zeigt, sinken die spektralen Anteile der Sonne im Nah-Infrarot-Bereich stark und haben dort ausgeprägte Minima.



Abbildung 3.43: Quantenwirkungsgrad der hochdynamischen Kamera

Um den Bereich der Wellenlänge auf den Nah-Infrarot-Bereich zu beschränken, werden in der Regel schmalbandige Interferenzfilter eingesetzt. Die Übertragungsfunktion eines solchen Interferenzfilters ist in Abb. 3.18 auf Seite 50 dargestellt.

Es muß aber nicht zwangsläufig ein Interferenzfilter eingesetzt werden, das einerseits kostenintensiv ist, zusätzlich eine große Bauhöhe besitzt und stark richtungsabhängig ist. Für die NIR-Bildaufnahme reicht es aus einen NIR-Filter zu benutzen, der die Übertragungsfunktion eines Tiefpasses besitzt (Abb. 3.44). Da die Empfindlichkeit der Sensoren zu längeren Wellenlängen sowieso abnimmt (Abb. 3.43) ergibt sich durch die Kombination beider Kennlinien die Übertragungsfunktion eines Bandpasses. Die NIR-Filter sind im Vergleich zu den Interferenzfiltern leichter herzustellen und somit auch wesentlich günstiger.

Zur Veranschaulichung ist in Abb. 3.43 der Quantenwirkungsgrad der hochdynamischen Kamera über der Wellenlänge beispielhaft dargestellt. Da diese Charakteristik hauptsächlich vom Werkstoff (Silizium) und von der verwendeten CMOS-Technologie abhängt, gilt die Abb. 3.43 quantitativ auch für andere CMOS-Bildsensoren derselben Technologie und qualitativ auch für CCD-Bildsensoren. Die Kennlinie der Durchlässigkeit eines handelsüblichen NIR-Filters ist in Abb. 3.44 abgebildet. Solche NIR-Filter können wesentlich kostengünstiger als NIR-Interferenzfilter produziert werden und aufgrund der geringen Bauhöhe problemlos in ein optisches System integriert werden. Die NIR-Filter sind je nach Anforderung auch mit anderen Grenz-Wellenlängen erhältlich.

Die Kombination aus NIR-Filter und CMOS-Bildsensor ergibt einen Verlauf des Quantenwirkungsgrades, der dem eines Bandpasses gleicht. Die mittlere Bandbreite ist zwar wesentlich größer als bei einem NIR-Interferenzfilter, aber wie die Aufnahmen gezeigt



Abbildung 3.44: Spektrale Transparenz eines NIR-Filters



Abbildung 3.45: Quantenwirkungsgrad der Kombination aus NIR-Filter und CMOS-Bildsensor



Abbildung 3.46: CMOS-Kamera mit NIR-Beleuchtung

haben ist es nicht notwendig, mit einem NIR-Interferenzfilter die Anteile des sichtbaren Lichts zu dämpfen. Die Anteile der *Störquelle* Sonne sind in diesem Bereich recht niedrig. Der Quantenwirkungsgrad der Kombination wird hauptsächlich vom Quantenwirkungsgrad des CMOS-Bildsensors beeinflußt.

Um ein sogenanntes NIR-Bild aufzunehmen, wird ein Bild mit NIR-Beleuchtung $I_{gepulst}(p, t)$ und ein herkömmliches Bild I(p, t) ohne Beleuchtung aufgenommen. Die Differenz der beiden Bilder ergibt ein NIR-Bild, das unter Einhaltung gewisser Randbedingungen keine Einflüsse von anderen Beleuchtungsquellen zeigt (siehe [66]). Die erste Bedingung ist, daß die Kennlinie des Sensors linear ist, so daß durch die Differenz der Anteil, der in beiden Bildern enthalten ist, vollständig eliminiert wird. Die zweite Randbedingung ist, daß der Sensor, die Bedingung in 3.29 erfüllt. Die Abbildung 3.46 zeigt beispielhaft die HFR-Kamera (Seite 64) mit einem Ring aus Infrarot-Dioden, die zum Test der NIR-Bildaufnahme eingesetzt wurde.

$$I_{NIR}(p,t) = I_{qepulst}(p,t) - I(p,t)$$
(3.30)

Geht man von Gleichung (3.19) aus, setzt sich der Grauwert aus der Bestrahlungsstärke der Quelle, dem Reflexionsfaktor und dem Faktor $I_{Pixel,Norm}$ zusammen.

$$I(p,t) = \rho(p,t) \cdot H_{e,Quelle}(p,t) \cdot I_{Pixel,Norm}$$
(3.31)

Durch Einsetzen in die Gleichung (3.30) erhält man die Gleichung eines NIR-Bild, das nicht von $H_{e,Quelle}(p,t)$ abhängt. Die Sonne ist in diesem Fall die störende Quelle.

$$I_{NIR}(p,t) = \rho(p,t) \cdot (H_{e,Quelle}(p,t) + H_{e,gepulst}(p,t)) \cdot I_{Pixel,Norm} -\rho(p,t) \cdot H_{e,Quelle}(p,t) \cdot I_{Pixel,Norm}$$

$$I_{NIR}(p,t) = \rho(p,t) \cdot H_{e,gepulst}(p,t) \cdot I_{Pixel,Norm}$$
(3.32)

In Abb. 3.47 ist die Berechnung eines NIR-Bildes schematisch mit Beispielaufnahmen dargestellt. Die Bilder wurden mit der MFM-Kamera (Abschnitt 3.5 Seite 59) aufgenommen, die ein sehr hohes FPN besitzt. Die Bilder zeigen eine Leselampe und einen Stuhl vor zwei Fenstern. Das FPN ist im beleuchteten sowie im unbeleuchteten Bild gut zu sehen. Da es



Abbildung 3.47: NIR-Bildaufnahme

74



Abbildung 3.48: Sequenz von NIR-Bildern



Abbildung 3.49: SBE- und KSE-Sequenz aus NIR-Bildern

in beiden Bildern ungefähr gleich groß ist, wird es durch die Berechnung fast vollständig entfernt und ist im NIR-Bild stark gesenkt.

Weiterhin wird jetzt die Wirkung dieser Aufnahmemethode deutlich: Sowohl die Fenster als auch die Raum-Beleuchtung sind im NIR-Bild vollständig unterdrückt. Objekte, die außerhalb der Reichweite der NIR-Beleuchtung sind, werden ebenfalls nicht erfaßt. Durch die Steuerung der Leistung der NIR-Beleuchtung wird eine Empfindlichkeit in der Tiefe erreicht. Für den optischen Innenraumschutz ist diese Eigenschaft eine sehr gute Möglichkeit zwischen Innen- und Außenraum zu differenzieren. Ein weiteres Beispiel für NIR-Bilder ist in Abb. 3.48 abgebildet und zeigt ein Spielzeugauto, das auf einem Blatt Papier über einen Tisch rollt. Innerhalb der aufgenommenen Sequenz hat sich die Raumbeleuchtung stark geändert. Diese Sequenz wurde mit der HFR-Kamera aufgenommen.

In Abb. 3.49 sind jeweils vier Frames aus einer SBE- und einer KSE-Sequenz dargestellt, die mit der hochdynamischen CMOS-Kamera aufgenommen wurden. In der SBE-Sequenz steigt eine Person auf dem Beifahrersitz ein und beugt sich nach vorn, so daß sie Out-of-Position ist. Die KSE-Sequenz zeigt den Einbau eines Kindersitzes, der entgegen der Fahrtrichtung orientiert ist. Beide Sequenzen wurden mit dem beschriebenen NIR-Aufnahme-Verfahren aufgenommen. Weitere NIR-Sequenzen wurden auch während der Fahrt aufgenommen. Sie sollten sich aber von den Sequenzen, die im Stand aufgenommen wurden, nicht unterscheiden, außer wenn sich zwischen der Aufnahme des beleuchteten und des unbeleuchteten Bildes die Beleuchtungsverhältnisse stark ändern. Aus diesem Grund sollte die Zeit zwischen diesen Aufnahmen so kurz wie möglich sein, welches den



Abbildung 3.50: Verschiebung des Bildes bei Translation

Einsatz einer Hochgeschwindigkeits-Kamera befürwortet. Außerdem kann je kürzer die Belichtungszeit ist die Leistung der NIR-Beleuchtung umso größer sein, ohne dabei die Laser-Klassen Bestimmung zu verletzen. Durch diese Maßnahme wird das SNR Verhältnis verbessert.

3.7 Kalibration

Bei einem Bildverarbeitungssystem ergibt sich zwangsläufig an vielen Stellen die Notwendigkeit einer Kalibration. Eine Kalibration ist z.B. die Messung einer nicht vollständig linearen Kennlinie eines Bildsensors, um die zugehörigen linearen Werte in einer Look-Up-Table abzuspeichern. Eine andere Kalibration ist die Berücksichtigung von Verzeichnungen, die durch das Objektiv eingeführt werden. Eine solche Kalibration wurde in [31] für das Fischaugen-Objektiv, das in dieser Arbeit verwendet wurde, untersucht. Auf beide genannten Arten der Kalibration wird in dieser Arbeit nicht näher eingegangen, da sie in der Literatur eingehend beschrieben sind.

Die Kalibration auf die in dieser Arbeit eingegangen wird, ist die Kalibration des gesamten Systems nachdem die Kamera in ihrer endgültigen Position eingebaut ist. Sie ist notwendig, da durch die Montage Toleranzen eingeführt werden, die sich störend auf die Auswertung auswirken.

Die Toleranzen können Translationen in x-, y- und z-Richtung (Abb. 3.50) und Rotationen um die x-, y- und z-Achse sein (Abb. 3.51).

Translationen in x-, y-Richtung und Rotationen um die z-Achse erzeugen Verschiebungen des beobachteten Bereichs um den selben Wert, d.h. eine Translation um $\pm \Delta x$ ergibt eine Verschiebung des Bildinhaltes um den selben Wert.

Translationen in z-Richtung und Rotationen um die x- und y-Achse wirken sich bei gleicher Einbau-Toleranz stärker aus, wie die Abb. 3.51, die Gleichungen 3.34 und 3.33 zeigen. Bei einer axialen Einbau-Toleranz von $\Delta \alpha$ ergibt sich eine Verschiebung des Eingangsbildes um

$$\Delta x = z \tan(\alpha + \Delta \alpha) - x. \tag{3.33}$$

Bei einer Translation in z-Richtung berechnet sich die Verschiebung zu

$$\Delta x = (z + \Delta z) \tan(\alpha) - x. \tag{3.34}$$



Abbildung 3.51: Verschiebung des Bildes bei Rotation

Beispiel: Aus der Position Nr. 6 aus Tabelle 3.1 und einer Einbau-Toleranz von $\pm 1^{\circ}$ beträgt die Verschiebung $\pm 2,35$ cm. Um dieselbe Verschiebung des Bildes durch eine Translation in z-Richtung zu erreichen, beträgt die Einbau-Toleranz Δz 1,7 cm. Daraus kann geschlossen werden, daß axiale Einbau-Toleranzen die größte Verschiebung bewirken.

Für den optische Innenraumschutz ist die Unterscheidung von Innen- und Außenraum wichtig. Diese kann durch eine binäre Kalibrationsmaske erfolgen, die nach der Montage der Kamera erzeugt wird. Bei konstanten Beleuchtungsverhältnissen, die bei der Montage herrschen, kann mit einer einfachen Schwellwertbildung eine solche Kalibrationsmaske erzeugt werden. Im linken Bild von Abb. 3.52 ist der vordere Innenraum bei normalen Beleuchtungsverhältnissen aufgenommen worden. Das Ergebnis der Schwellwert-Operation ist rechts daneben dargestellt. Der Außenraum ist mit schwarz und der Innenraum mit weiß repräsentiert. Wie man in diesem binären Bild erkennt werden noch einige kleine Bereiche im Inneren des Fahrzeugs als zum Außenraum zugehörig gekennzeichnet. Diese Bereiche, die Blobs genannt werden, können mit einfachen morphologischen Operatoren, die auch in Abschnitt 4.3 eingesetzt werden, entfernt werden. Die einmal erzeugten Kalibrationsmasken können in einem Speicher abgelegt und bei Bedarf aufgefrischt werden. Hierzu wird nach dem selben Verfahren eine neue Kalibrationsmaske erzeugt und mit der alten verglichen. Dadurch können Verschiebungen, die nach der Montage auftreten berücksichtigt werden. Die endgültigen Kalibrationsmasken für den vorderen und den hinteren Innenraum sind in Abb. 3.53 abgebildet.

Ein weiterer Aspekt der Kalibration ist die Bestimmung fester Punkte, wie z.B. die Positionen der Airbags und der Instrumententafel, die für die optische Sitzbelegungserkennung – besonders die Out-of-Position-Erkennung – wichtig sind. Diese Punkte könnten entweder während der Montage durch Aufkleber oder ständig durch Punkte, die nur im NIR-Bereich reflektieren, gekennzeichnet werden. Bei der zweiten Variante können die Positionen der Punkte jederzeit neu bestimmt werden und somit nachträgliche Bewegungen der Kamera ausgeglichen werden. Die Bestimmung dieser Punkte gestaltet sich sehr einfach, da erstens die Position der Punkte grob bekannt ist und auch die Form und das Muster vorgegeben werden können, so daß sich die Punkte gut vom Muster des Interieurs unterscheiden. Ein einfacher Korrelationsoperator sollte in der Lage sein, die Position mindestens pixelgenau zu berechnen.



Abbildung 3.52: Kalibration: Maskenerzeugung



Abbildung 3.53: Endgültige Masken



Abbildung 3.54: Überwachter Bereich aus Kameraposition Nr. 6

3.8 Zusammenfassung

78

Der endgültige Einbauort für den vorderen Innenraum ist die Position Nr. 6. Für den hinteren Innenraum wird die Position Nr. 5 gewählt (Tabelle 3.1). Die Abb. 3.54 zeigt in einer Skizze den Bereich, der aus der Position Nr. 6 überwacht werden kann.

Zur Unterdrückung externer Beleuchtungseinflüsse wird eine NIR-Beleuchtung vorgeschlagen, die in Kombination eines NIR-Filters und der NIR-Bildaufnahme in der Lage ist, die Störungen weitgehend zu eliminieren(Abschnitt 3.6).

Als Sensor wird eine CMOS-Kamera mit linearen Pixeln und einer Dynamik pro Bild von mindestens 80 dB vorgeschlagen, der über eine verstellbare Integrationszeit eine globale Dynamik von mindestens 110 dB haben sollte. Die Auslese und die Analog/Digital-Wandlung sollten auf dem Bildsensor integriert werden [64]. Je nachdem welche Verarbeitung gewählt wird, besteht die Möglichkeit diese auch auf dem CMOS-Sensor zu integrieren (Abschnitt 4.2).

Als Objektiv wird das bereits vorgestellte Fischaugen-Objektiv vorgeschlagen, das einen Feldwinkel von $w = 75^{\circ}$, eine Brennweite von $f' = 2,2 \, m$ m und eine Blendenzahl von $Z_e = 2,0$, bei einer Abbildungsfläche des Sensors mit einer Diagonalen von ca. 1/3 Zoll (ca. 8,5 mm), besitzt. Möchte man eine örtliche Auflösung von $(5 \times 5) \, \text{cm/Pixel erreichen}$, die nach den Richtlinien in Abschnitt 2.2 mindestens für einen Innenraumschutz notwendig ist und vernachlässigt die extremen Verzeichnungen des Fischaugen-Objektivs beträgt die Sensorauflösung $(B \times T) = (38 \times 28)$ Pixel. Berücksichtigt man die Verzeichnungen des Fischaugen-Objektivs, dann sollten $(B \times T) = (60 \times 50)$ Pixel ausreichen, um die Ortsauflösung an jeder Stelle zu erreichen.

Die Sensorauflösung für die optische Belegungszustandserkennung ist stark vom Algorithmus abhängig. Es wird aber auf jeden Fall eine höhere Auflösung von etwa (128×128) Pixel bis (256×128) Pixel notwendig sein, um verschiedene Muster unterscheiden zu können. Um bei einer festen Sensorauflösung möglichst viele Anwendungen zu ermöglichen, wird eine Auflösung von (220×160) Pixel für die Anwendungen OIS und OBE vorgeschlagen. Der Rechenaufwand für die OIS kann durch Unterabtastung niedrig gehalten werden.

Um die Kalibration möglichst einfach zu gestalten, sollten im Innenraum Punkte mit Nah-Infrarot reflektierender Farbe gekennzeichnet werden, mit der es möglich ist, eine automatische Kalibration der Kamera durchzuführen. Weiterhin kann die hohe Bewegungsdynamik des Fahrzeugs bei unebener Fahrbahn Erschütterungen zur Folge haben, welche zu sprunghaften Verschiebungen der aufgenommenen Bilder führen. Daher sollte die Kamera mit der Fahrzeug-Karosserie unelastisch gekoppelt sein, damit es zu keiner eigenen Bewegung der Kamera relativ zum Fahrzeug kommen kann.

Aus der Sicht der NIR-Bildaufnahme, ist die Optimierung der Empfindlichkeit der Bildsensoren zum Nah-Infraroten-Bereich sehr sinnvoll. Dadurch könnte die Leistung der NIR-Beleuchtung bzw. die Anzahl der NIR-Dioden reduziert werden. Ein weiterer Aspekt zur Energieeinsparung ist die Bildrate. Je schneller ein Bild aufgenommen wird, desto geringer muß die Energie für die NIR-Beleuchtung bei konstantem SNR sein. Eine kurze Bildaufnahmezeit ist auch für der NIR-Bildaufnahme sinnvoll, da der zeitliche Abstand zwischen belichtetem und unbelichtetem Bild möglichst kurz sein sollte.

Aus Sicht der zwei Anwendungen Innenraumschutz und Belegungszustandserkennung wird die höchste Bildrate von der Out-of-Position Erkennung gefordert. Die Zeit die eine optische Out-of-Position Erkennung benötigen soll, sollte im Bereich von 10 ms liegen. Nach den Richtlinien für FAS liegt die höchste Prüfgeschwindigkeit, mit der sich ein Objekt durch den Innenraum bewegt, bei 1,5 m/s. Es wird aber keine Angabe zur zeitlichen Auslösung eines Alarms gemacht. Setzt man voraus, daß man ein Prüfobjekt nach [25] nimmt und ein Alarm erst dann ausgelöst werden muß, wenn das Prüfobjekt vollständig im Innenraum ist, erhält man eine theoretische Bildrate von 7,5 Hz.

Neben den direkten Einflüssen sind alle elektronischen Systeme im Fahrzeug extremen Schwankungen von Temperatur (-40° C bis $+80^{\circ}$ C) und Feuchtigkeit ausgesetzt. Optische Systeme im speziellen müssen mit Einflüssen von Staub, Rauch (Zigaretten), Kondensation und Verschmutzung zurecht kommen. Gegen Beschlag kann die Optik mit einer Anti-Beschlag Beschichtung beschichtet werden.