

Abschlussbericht zu MIDIAS Verbundprojekt

ZE: Siemens AG Corporate Technology CT T DE HW 2	Förderkennzeichen: 16SV2263
Autor: Anton Schick Ludwig Listl	
Vorhabensbezeichnung: MIDIAS - Integriertes optisches Mikrosystem mit dreidimensionaler Informationsverarbeitung für Fahrerassistenzsysteme	
Laufzeit des Vorhabens: 01.06.2006 – 31.12.2009	
Berichtszeitraum: 01.06.2006 – 31.12. 2009	

Inhalt

1	AUFGABENSTELLUNG	3
2	VORAUSSETZUNGEN	3
3	PLANUNG UND ABLAUF	3
4	WISSENSCHAFTLICH- TECHNISCHE ERGEBNISSE	3
4.1	Überblick	3
4.2	AP1: Spezifikation der Anforderungen an das Sensorsystem	4
4.3	AP3.1: 3D CMOS Sensor - Laserbeleuchtung	5
4.3.1	Anforderungen an die Laserbeleuchtung	5
4.3.2	Design der Strahlformoptik (Beleuchtung)	8
4.3.3	Reflexionsverhalten an der Windschutzscheibe	9
4.4	AP3.2: 3D CMOS Sensor - Chip	14
4.4.1	Charakterisierung des 64x8 Pixel CMOS Arrays	14
4.5	AP3.3: 3D CMOS Sensor – Optik, Algorithmen, Systemintegration	17
4.5.1	3D-Algorithmik	17
4.5.2	Optische Komponenten für 3D-CMOS Sensor	19
4.6	AP5: Fusion auf Pixelebene	20
4.6.1	AP5.1: Hardware Architektur	20
4.6.2	AP5.2: Aufbereitung der Algorithmen zur Datenfusion	24
4.6.3	AP5.3: Hardwarenahe Software	25
4.6.4	AP5.4: Test und Evaluierung	27
5	VORAUSSICHTLICHER NUTZEN, VERWERTBARKEIT DER ERGEBNISSE	29
6	BIBLIOGRAPHIE, VERÖFFENTLICHUNGEN	29

1 Aufgabenstellung

Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines neuen Kamerasystems in Mikrosystemtechnik, das kombinierte 2D/3D Bildinformation für künftige Fahrerassistenzsysteme in der Automobiltechnik bereitstellt. Geplante Anwendungen der Kamera sind die Detektion und Klassifikation anderer Verkehrsteilnehmer (Fußgänger, Radfahrer, LKWs), die Erkennung weiterer stationärer Hindernisse (Bäume, Fahrspurbegrenzungen, Leitplanken) sowie Systeme zur Verkehrszeichenerkennung.

2 Voraussetzungen

Es existieren bereits hoch dynamische 2D-Graubildsensoren und relativ niedrig auflösende 3D-Sensoren. Die Kombination der beiden Sensoren in einem einzigen Kamerasystem mit pixelsynchroner Intensitäts- und Abstandsinformation ermöglicht die zuverlässige Erfassung von Objekten im Umfeld des Kraftfahrzeugs, z. B. Erkennung von anderen Verkehrsteilnehmern, Hindernissen, Verkehrszeichen, Fahrspuren sowie daraus abgeleitete Funktionen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit. Die Anforderungen an Sensoren für Fahrerassistenzsysteme sind extrem hoch, sowohl hinsichtlich der geforderten Zuverlässigkeit und Erkennungsleistungen aber auch hinsichtlich der Umgebungsbedingungen.

3 Planung und Ablauf

- Nach einer gründlichen Analyse des Standes der Technik zu Vorhabensbeginn wurde das in der Vorhabensbeschreibung skizzierte Kamerakzept mit einer einzigen optischen Erfassungseinheit, und einem Hot/Cold-Mirror zugunsten einer Doppeloptik aufgegeben.
- Weiter einigte sich das Konsortium auf die Verlagerung von Entwicklungsschwerpunkten von der Entwicklung des 2D HDR- Sensors auf die Optimierung und Weiterentwicklung des 3D-CMOS Sensors, da kommerzielle 2D HDR Sensoren, welche die Zielspezifikation an den 2D-Sensor erfüllten, bereits am Markt verfügbar sind.
- Als Entwicklungsziel für den 3D-CMOS Sensor wurde die Herstellung und Evaluierung des Sensors im neuen Photogate Prozess definiert, für den vom Partner FhG IMS sowohl eine höhere Auflösung als auch höhere Lichtempfindlichkeit prognostiziert wurde.
- Zur Spezifikation der Anforderungen an den 3D-CMOS Chip wurde eine Vielzahl von Testszenarien mit einer vorhandenen 3D-CMOS Prototyp- Kamera analysiert und bewertet.
- Zum Test der Kamerakalibrierung und der Fusionsalgorithmen wurde der vorhandene Prototyp mit einer handelsüblichen 2D-Kamera kombiniert.
- Wiederholte Terminschiebungen bei der 3D Chipentwicklung sowie bei der Fertigstellung des Sensorkopfes erforderten leider mehrfache Anpassungen der Terminpläne und schließlich eine Verlängerung der Projektlaufzeit bis Dezember 2009.
- Im Februar 2009 gab der Partner FhG IMS bekannt, dass der 3D-CMOS Sensor im Photogate Prozess nicht bis Projektende zur Verfügung stehen würde. Somit musste als Fallback- Lösung der vorhandene 64x8 Pixel 3D-CMOS Sensor aus dem EU-Projekt UserCams eingesetzt werden.
- Aufgrund der Terminverzögerungen bei der Chip- und Hardwareentwicklung stand der Sensorkopf leider erst nach offiziellem Projektende zur Verfügung, so dass der Einbau und die Evaluierung des Gesamtsystems im Versuchsfahrzeug nicht mehr wie geplant in der der Projektlaufzeit durchgeführt werden konnten.

4 Wissenschaftlich- technische Ergebnisse

4.1 Überblick

Im Folgenden sind die wichtigsten, von Siemens CT im Betrachtungszeitraum durchgeführten Arbeiten und erzielten Ergebnisse dargestellt.

Das Projekt MIDIAS ist entsprechend dem in der Vorhabensbeschreibung enthaltenen Zeit- und Meilensteinplan in 7 Arbeitspakete untergliedert.

- AP1: Systemdefinition und -spezifikation
- AP2: 2D Sensor
- AP3: 3D-CMOS Sensor,
 - Task 3.1- Laserbeleuchtung
 - Task 3.2- Konzeption und Entwicklung eines "scannerlosen", auf Puls-Laufzeit basierenden 3D CMOS Sensors als Demonstrator für die zu realisierende 2D/3D Kamera
 - Task 3.3- Systemintegration, Optik, FPGA
- AP4: Mikrosystemtechnische Integration

- Task 4.1- Aufbau und Verbindungstechnik
- Task 4.2- Gehäusekonzept und Optiksistem
- AP5: Fusion auf Pixelebene
 - Task 5.1- Algorithmik, FPGA-Code, ASIC/FPGA Architektur
 - Task 5.2- Aufbereitung der Algorithmen zur Datenfusion im FPGA/ASIC
 - Task 5.3- Hardwarenahe Software für FPGA
 - Task 5.4- Test & Evaluierung des 2D/3D Systems
- AP6: Fahrzeugintegration
- AP7: Management / Koordination

Die Arbeiten von Siemens konzentrierten sich gemäß Vorhabensbeschreibung im Wesentlichen auf die Arbeitspakete AP1, AP3, und AP5.

Die Beschreibung der Aktivitäten und Ergebnisse werden diesen Arbeitspaketen zugeordnet.

4.2 AP1: Spezifikation der Anforderungen an das Sensorsystem

Die Anforderungen und Spezifikationen an das zu entwickelnde 2D/3D Kamerasystem wurden mit Bezug auf verschiedene Automobil- Anwendungen neu untersucht und definiert. Dabei ergaben sich deutliche Änderungen zum ursprünglichen Konzept. Die wesentlichen Änderungen beinhalten:

- Während des Entwicklungszeitraumes wurden Entwicklungsschwerpunkte von der Entwicklung des 2D- Sensors auf die Optimierung und Weiterentwicklung des 3D-CMOS Sensor verlagert, da das Konsortium sich nach Bewertung der am Markt erhältlichen HDR- Sensoren auf die Verwendung des 2D- Sensors von Aptina (vormals Micron) einigte. Dieser Chip erfüllt die ursprünglich im Projekt definierte Zielspezifikation.
- Aufgrund der hohen Anforderungen der Zielapplikationen wurde für den 3D-CMOS Sensor eine möglichst Auflösung bei hoher Lichtempfindlichkeit und geringem Rauschen spezifiziert. Im ersten Entwicklungsschritt sollte die Auflösung des aus dem UseRCams Projekt vorhandenen Chips erhöht werden und die festgestellten Einschränkungen (insbesondere Crosstalk, Temperaturverhalten) abgestellt werden. In einer 2. Phase sollte dieser Chip durch einen deutlich empfindlicheren und höher auflösenden Chip in der vom FhG IMS neu entwickelten Photogate CMOS- Technologie ersetzt werden.
- Die Applikationsanforderungen bedingen folgende Spezifikationen an die einzusetzenden Bildsensoren:
 - Als 2D-Sensor kommt nur ein HDR-Sensor (high-dynamic range) in Frage
 - Die hohen Dynamikanforderungen an den 3D-CMOS Sensor werden durch pixel-spezifische adaptive Integration einer Vielzahl von Laserpulsen direkt auf dem Chip gewährleistet.
 - Eine Übersteuerung einzelner Pixel ist trotz der hohen Sensordynamik jedoch nicht immer zu vermeiden, darf jedoch nicht zu einer Fehlmessung auf Nachbarpixel führen.
- Durch die Ressourcenverlagerung AP2 (2D Sensor) zu AP3 (3D-CMOS Sensor) konnten die sehr hohen Anforderungen an den 3D-CMOS Chip in AP3 sehr ausführlich analysiert werden und durch theoretische Analysen und weitere experimentelle Arbeiten untermauert werden. Dazu wurde ein vorhandenes 3D-Sensorsystem aus dem Projekt UseRCams als Testsystem eingesetzt. Hierbei ergaben sich zahlreiche neue Erkenntnisse, die für die weitere Chipentwicklung des 3D-CMOS Sensors von weitreichender Bedeutung waren.
- Die zur Absicherung der Zielspezifikation durchgeführten Tests betrafen beim 3D-CMOS Sensor insbesondere die Analyse von Umwelteinflüssen wie Fremdlicht und Temperatur. Dabei zeigten sich beim vorhandenen Sensor eine ausgeprägte Übersprechneigung bei stark reflektierenden Lichtquellen (Retroreflektoren) sowie ein starkes nichtlineares Temperaturverhalten. In begleitenden Simulationen konnte die Ursache für das Übersprechen gefunden und Abhilfemaßnahmen beim neuen Photogate Chipdesign eingeleitet werden.
- Als Ergebnis der umfangreichen Analysen wurde die Zielspezifikation für das Chipdesign des 3D-CMOS Sensor entsprechend angepasst.
- Den Anforderungen an den 3D-CMOS Sensor sollte vom Projektpartner FhG IMS durch eine zweistufige Chipentwicklung Rechnung getragen werden:

- Weiterentwicklung des vorhandenen UserCams Chip auf 128x8 Pixel
Nach positiven Ergebnissen von FhG IMS zum Photogate- Prozess wurde diese Alternative im Oktober 2008 aufgegeben.
 - Entwicklung eines verbesserten Chips in neuer Photogate Technologie
Dieser Prozess bietet die Möglichkeit durch rauscharme Ladungsverschiebung in die sogenannten Transfergates des Sensors die Auflösung (Pixelanzahl) bei gleichbleibender oder sogar besserer Empfindlichkeit deutlich weiter zu erhöhen. Leider konnte nach ersten positiven Ergebnissen im Oktober 2008 die Entwicklung des neuen Chips vom Partner FhG IMS in der Projektlaufzeit nicht abgeschlossen werden, so dass der Chip nicht mehr im laufenden Projekt verfügbar war.
- Zur Absicherung der Funktionalität des Sensorsystem bei Montage hinter der Windschutzscheibe wurden spezielle Untersuchungen durchgeführt:
 - Einfluss der Neigung der Scheibe
 - Einflüsse der Laserpolarisation auf die Lichttransmission
 - Wirkungen der Totalreflexion innerhalb der Scheibe
 - Die Ergebnisse dieser Analysen führten zur den Zielspezifikationen für Aufbau und Montage des Lasermoduls.
 - Die umfangreichen technischen Spezifikationen der Kamera wurden in einem gemeinsamen Dokument [7] zusammengefasst, zu dem alle Partner beigetragen haben und das alle Komponenten der Kamera sowie die Firmware- und Softwareentwicklung detailliert beschreibt. Dieser Bericht ist nicht öffentlich und kann bei den Projektpartnern eingesehen werden.

4.3 AP3.1: 3D CMOS Sensor - Laserbeleuchtung

Die Konzeptionierung und Entwicklung des Lasermoduls zur aktiven Beleuchtung der Szene für den 3D-CMOS Sensor durch Lewicki wurden durch begleitende Tests am vorhandenen Funktionsmuster unterstützt. Dabei wurden insbesondere die optischen Anforderungen an die geplante Einbauposition hinter der Windschutzscheibe analysiert sowie Überwachungsfunktionen zur Einhaltung der erlaubten Betriebsart definiert.

Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeiten war das Design der Strahlformoptik für die Laserbeleuchtung.

4.3.1 Anforderungen an die Laserbeleuchtung

Entscheidend für die geforderte Bildrate des 3D-CMOS Sensors von 50 Hz bis 100 Hz ist unter anderem die Wiederholrate der eingesetzten Pulsmodulen. Um eine thermische Überlastung des Lasers zu vermeiden darf ein vom Hersteller spezifiziertes Tastverhältnis (Duty Cycle) nicht überschritten werden. In den Datenblättern der Hersteller wird typischerweise ein maximales Tastverhältnis von 0,1% angegeben. Dies bedeutet, dass bei einer Pulsdauer von z.B. 300 ns eine Pulswiederholrate von 3,3 kHz erreicht wird. Da für die Entfernungsberechnung nach dem MDSI- Verfahren bis zu 200 Laserpulse verwendet werden (adaptive Integration) ist damit jedoch nur eine Bildwiederholrate von ca. 15 Hz realisierbar.

Ein wesentliches Entwicklungsziel für die Pulsmodulen ist daher, durch eine geeignete Aufbau- und Kühlkonzepte der Lasermodule die Pulswiederholrate auf mindestens 20 kHz (bei 300 ns Pulsdauer) zu steigern, sowie die Einhaltung des spezifizierten Betriebsparameter durch integrierte Selbstüberwachung zu gewährleisten. Die ist insofern von großer Bedeutung, da im Fahrzeug sehr hohe Umgebungstemperaturen auftreten können, die zur thermischen Überlastung und damit Zerstörung des Lasermoduls führen könnten. Zum anderen ist für die Augensicherheit die Einhaltung der Laserklasse 1 zwingend, so dass bei Verletzung der sicheren Betriebsbedingungen eine Selbstabschaltung des Lasers erforderlich ist.

Das MDSI-Verfahren zur Laufzeitberechnung stellt zudem hohe Anforderungen an die Stabilität des abgestrahlten Pulses. Abweichungen vom spezifizierten Timing führen unmittelbar zu Messfehlern im Abstandsbild.

Im Berichtszeitraum haben wir die im Funktionsmuster eingesetzten Lasermodule, die als Basis für die Weiterentwicklung in MIDIAS dienen, bezüglich dieser entscheidenden Kenngrößen evaluiert.

Stabilität beim Einschalten

Bedingt durch die thermische Aufheizung der Lasermodule ergibt sich nach dem Einschalten im Laufe der Zeit eine Reduktion der abgestrahlten Leistung, da sich durch Verlustleistung der Module die Temperatur erhöht und die angestrahlte Leistung der Laserdioden temperaturabhängig ist.

Um eine permanente Zerstörung des Lasers zu verhindern darf nach den Angaben der Laserdiodenhersteller die Leistung nicht unter 70% des Anfangswertes abfallen. Die folgende Abbildung zeigt das gemessene zeitliche Profil der Laserleistung für eine Pulsbreite von 60 ns und eine Pulswiederholrate von 30 kHz.

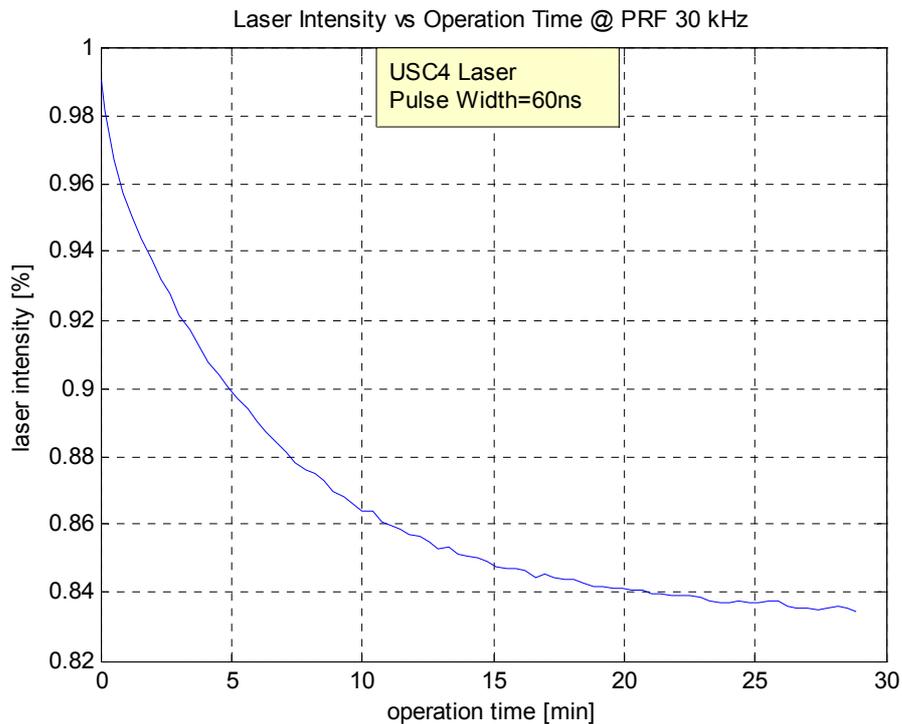


Abbildung 1: Abgestrahlte Laserleistung über die Betriebszeit

Für die gewählten Parameter stabilisiert sich nach ca. 25 Minuten die Laserleistung auf einen Wert von 83% der Ausgangsleistung, die Betriebsart des Lasermoduls mit einem Duty-Cycle von 0,18% liegt somit im erlaubten Bereich.

Für längere Pulsdauern, wie sie für die MIDIAS- Anwendungen erforderlich sind, ergab sich jedoch (bei gleicher Pulsfrequenz) ein Leistungsabfall unter 70% der Ausgangsleistung.

Im Projekt wurden daher eine zusätzliche Kühlung mit Heatpipes und eine Verbesserung der Wärmeableitung spezifiziert.

Temperatur- und Jitterverhalten

Entscheidend für die Genauigkeit der Abstandsmessung mit der Time-of-Flight Technologie ist die Stabilität des Systems gegenüber Temperatureinflüssen. Dies betrifft u.a. die Triggerverzögerungszeit und die Pulsform des Lasers. Diese Parameter werden in Prinzip bei der Kalibrierung des Sensors ermittelt und bei der Abstandsberechnung berücksichtigt. Durch Temperaturänderungen hervorgerufene Drifts sollten durch eine geeignete Aufbautechnik soweit wie möglich vermieden werden und müssen ggf. ebenfalls bei der Kalibrierung berücksichtigt werden.

Die Ergebnisse der Temperaturtest sind in nachstehender Tabelle und Bildern zusammengefasst.

Temperatur [°C]	Triggerdelay [ns]	Pulsbreite [ns]	Amplitude [V]
5	63,9	178,1	1,188
15	65,3		
25	66,7	178,2	1,124
35	67,9		
45	69,5	178,3	1,02
55	70,8	178,2	0,94

Tabelle 1: Laserpulsp Parameter in Abhängigkeit von der Temperatur

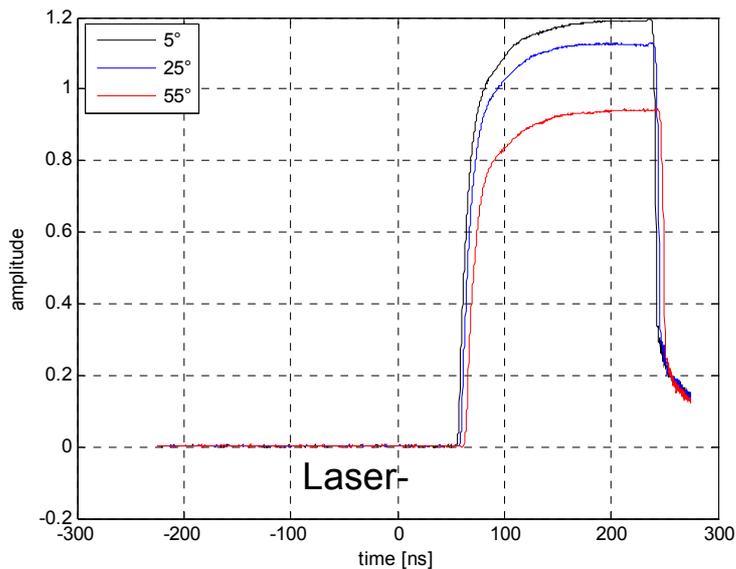


Abbildung 2: Laserpuls bei verschiedenen Temperaturen

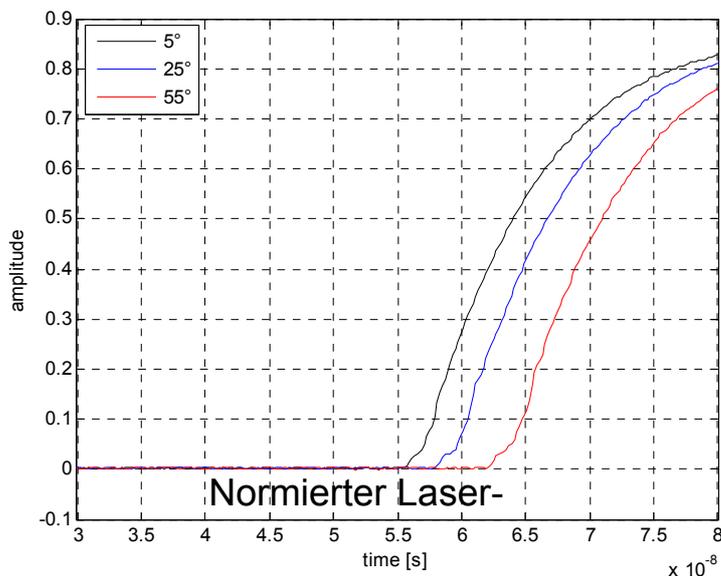


Abbildung 3: Laserpulsverzögerung bei verschiedenen Temperaturen

Bedingt durch die thermische Aufheizung der Lasermodule ergeben sich in Abhängigkeit von der Temperatur eine Leistungsverringerung und gleichzeitig eine Verzögerung des Pulses. Während der Leistungsabfall nicht zu einem systematischen Fehler für den ermittelten Abstandswert führt, verursacht die temperaturabhängige Pulsverzögerung unmittelbar einen Fehler im Abstandswert und muss daher im Verfahren korrigiert werden.

Temperatur- und Leistungsüberwachung

Um einen Ausfall der Lasermodule durch Fehlparametrierung bzw. durch Überhitzung zu vermeiden wurden zusätzlich folgende Anforderungen an die Selbstüberwachung der Lasermodule in die Spezifikationen aufgenommen:

- Integrierte Temperaturüberwachung
 - Temperatursensor
 - Selbstständiges Abschalten bei kritischer Betriebstemperatur
 - Möglichkeit der Temperaturabfrage über I2C
- Integrierte Leistungsüberwachung
 - Abschaltung bei Überschreiten eines maximalen Strom (Schutz vor Fehlparametrierung der Pulswiederholrate)
 - Abschaltung bei Überschreiten einer maximaler Pulsbreite (Schutz vor Fehlparametrierung der Pulsbreite)

4.3.2 Design der Strahlformoptik (Beleuchtung)

Aufgabe der Laseroptik ist das vom Lasermodul abgestrahlte Licht effizient und möglichst homogen auf die Szene zu verteilen. Da die Bestrahlungsstärke auf dem Sensor die Messgenauigkeit bestimmt sollte das abgestrahlte Licht ausschließlich im Gesichtsfeld des Sensors konzentriert werden. Die Abstrahlcharakteristik der Laserdioden muss daher über eine geeignete Strahlformoptik angepasst werden. Da eine flächige Ausleuchtung realisiert werden soll, ist zunächst eine Kollimation der emittierten Laserstrahlung in beide Richtungen notwendig, deren Güte die anschließende Homogenisierungsqualität bestimmt. Die Optimierungsrechnung ergab, dass diese Aufgabe mit einer kommerziellen plankonkaven Zylinderlinse gelöst werden kann.

Die anschließende Homogenisierung der emittierten Laserstrahlung erfolgt mittels zwei doppelseitigen Mikrolinsenarrays. Das zugrundeliegende Prinzip ist das der Feldaufspaltung, d.h. jede Mikrolinse schneidet einen Teil der Emissionscharakteristik heraus und verteilt die aufgefangene Energie über den mit der numerischen Apertur der Linse korrespondierenden Bildbereich. Zur Anwendung kommen zwei Zylinderlinsenarrays. Die beiden doppelseitigen Arrays sind bezüglich der Ausrichtung der Zylinderlinsen um 90° zueinander gedreht angebracht. Abbildung 4 und Abbildung 5 zeigen den Aufbau der Strahlformoptik.

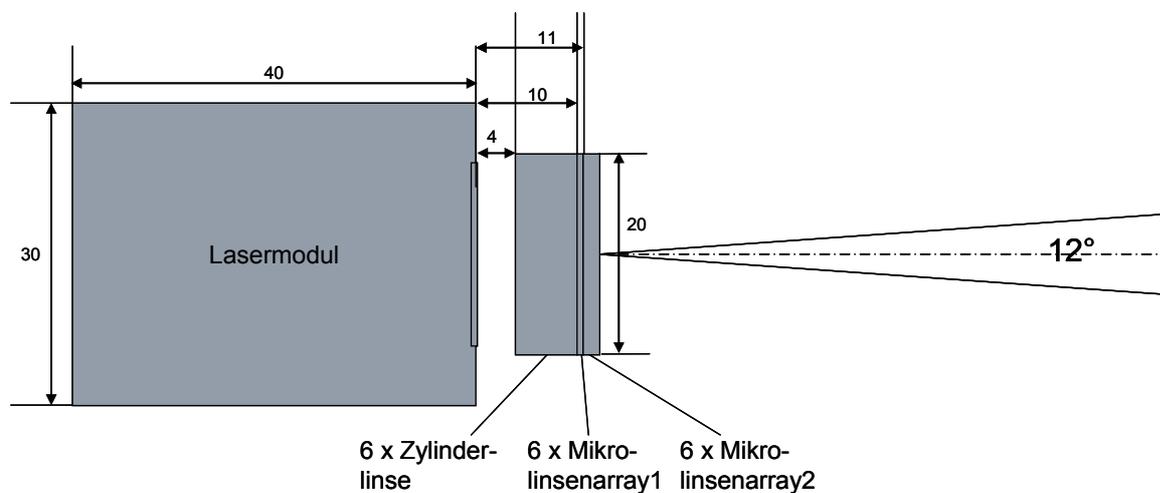


Abbildung 4: Seitenansicht Laser mit Laseroptik

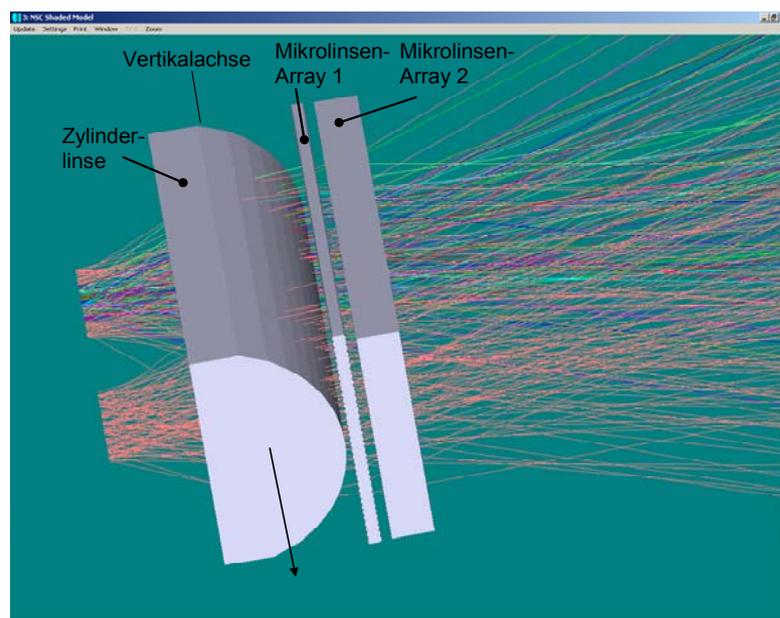


Abbildung 5: Laseroptik für 3D-CMOS Sensor

Damit ergeben sich die nachfolgend dargestellten Strahlprofile.

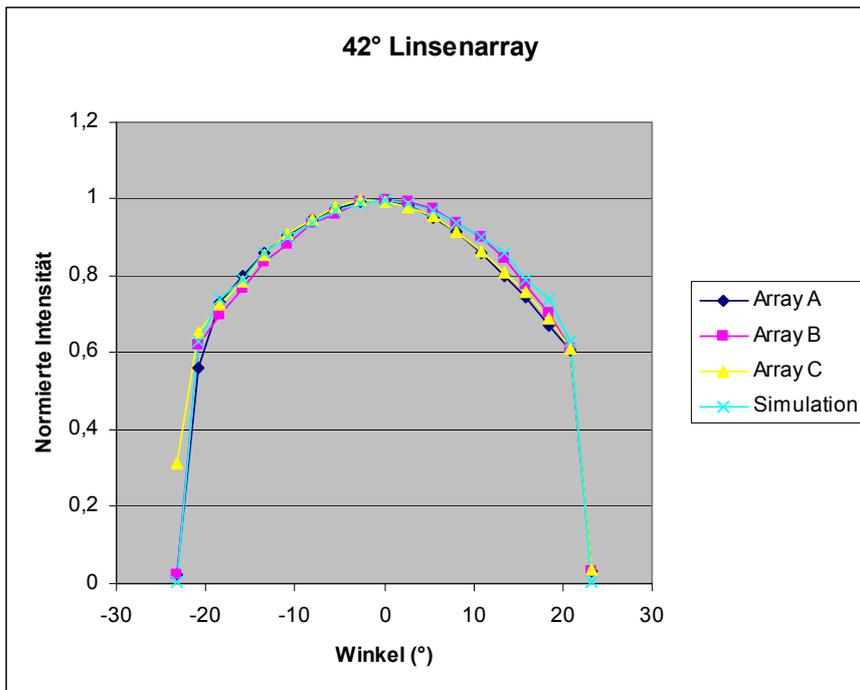


Abbildung 6: Horizontale Strahlprofil

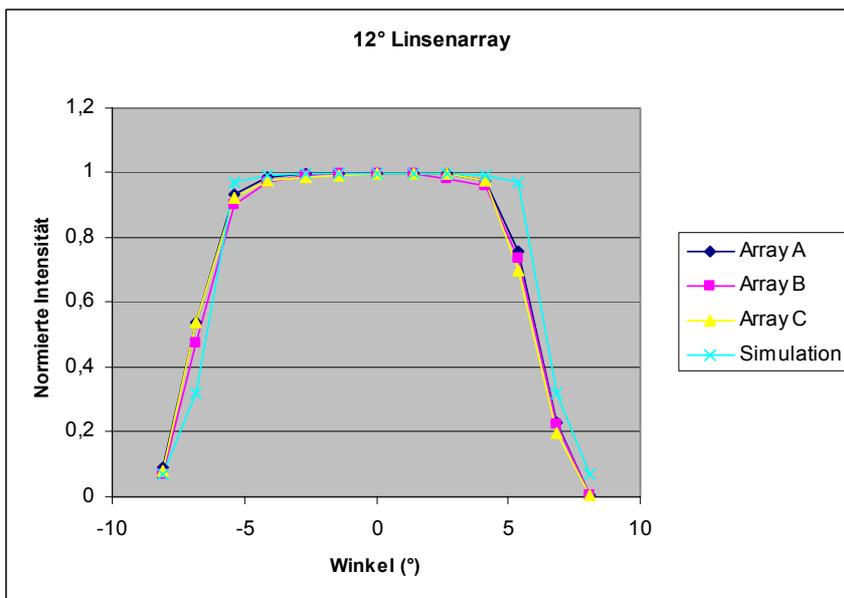


Abbildung 7: Vertikales Strahlprofil

4.3.3 Reflexionsverhalten an der Windschutzscheibe

4.3.3.1 Polarisationsverhalten der Laserdioden

Da vom Laserdiodenhersteller zunächst keine eindeutige Aussage zur Polarisation der Laserdioden vorlag haben wir in einem Versuchsaufbau die Polarisation der vorhandenen Laser untersucht. Dabei wurde ein drehbares Polarisationsfilter im Strahlengang positioniert und die abgestrahlte Laserleistung in Abhängigkeit des Drehwinkels gemessen.

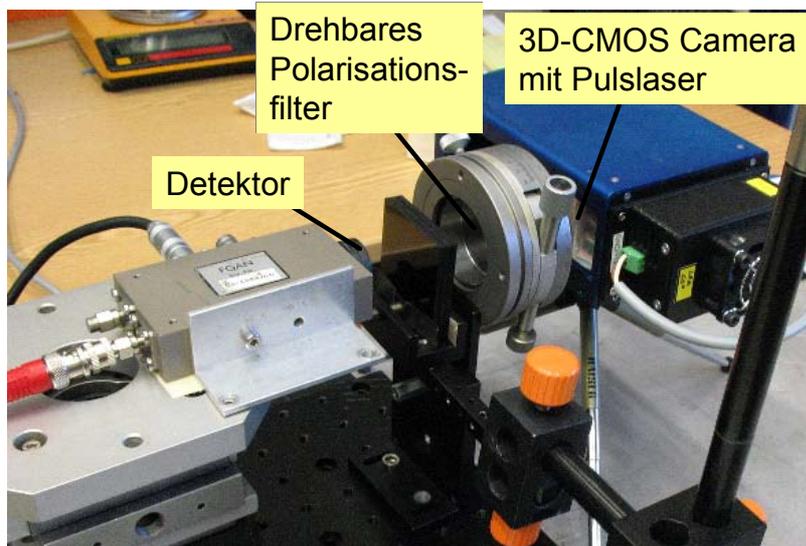


Abbildung 8: Aufbau zur Messung der Laserpolarisation

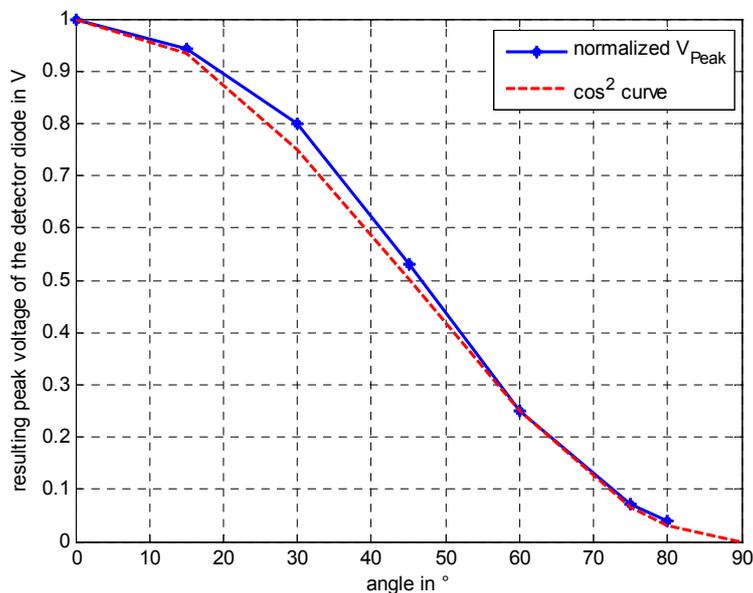


Abbildung 9: Abgestrahlte Laserleistung mit zusätzlichem Polarisationsfilter

Ergebnis:

- Die am Detektor gemessene Leistung fällt nach einem \cos^2 – Gesetz.
- Die Laserstrahlung ist somit linear polarisiert.

4.3.3.2 Reflexionsverhalten an Windschutzscheibe - Theoretische Betrachtung

Licht wird als transversale elektromagnetische Welle beschrieben. Dabei schwingt der elektrische Feldvektor senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle. Schwingt der E-Vektor auf einer Geraden so spricht man von linear polarisiertem Licht. Im Zusammenhang mit der Reflexion unterscheidet man zwischen:

- parallel- polarisiertes Licht (E-Feld parallel zur Einfallsebene)
- senkrecht- polarisiertes Licht (E-Feld senkrecht zur Einfallsebene)

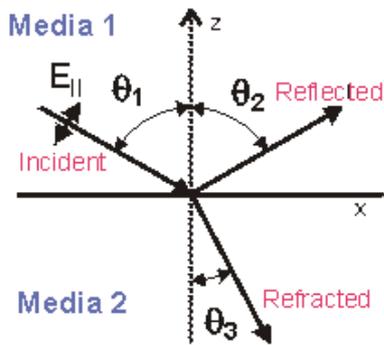


Abbildung 10: Fresnelsches Brechungsgesetz

Aus der elektromagnetischen Feldtheorie ergeben sich folgende Formeln für den Reflexions- bzw. und Transmissionskoeffizienten

a) parallel- polarisiertes Licht

$$R_{||} = \frac{\tan^2(\theta_1 - \theta_3)}{\tan^2(\theta_1 + \theta_3)}$$

$$T_{||} = \frac{\sin 2\theta_1 \sin 2\theta_3}{\sin^2(\theta_1 + \theta_3) \cos^2(\theta_1 - \theta_3)}$$

b) senkrecht- polarisiertes Licht

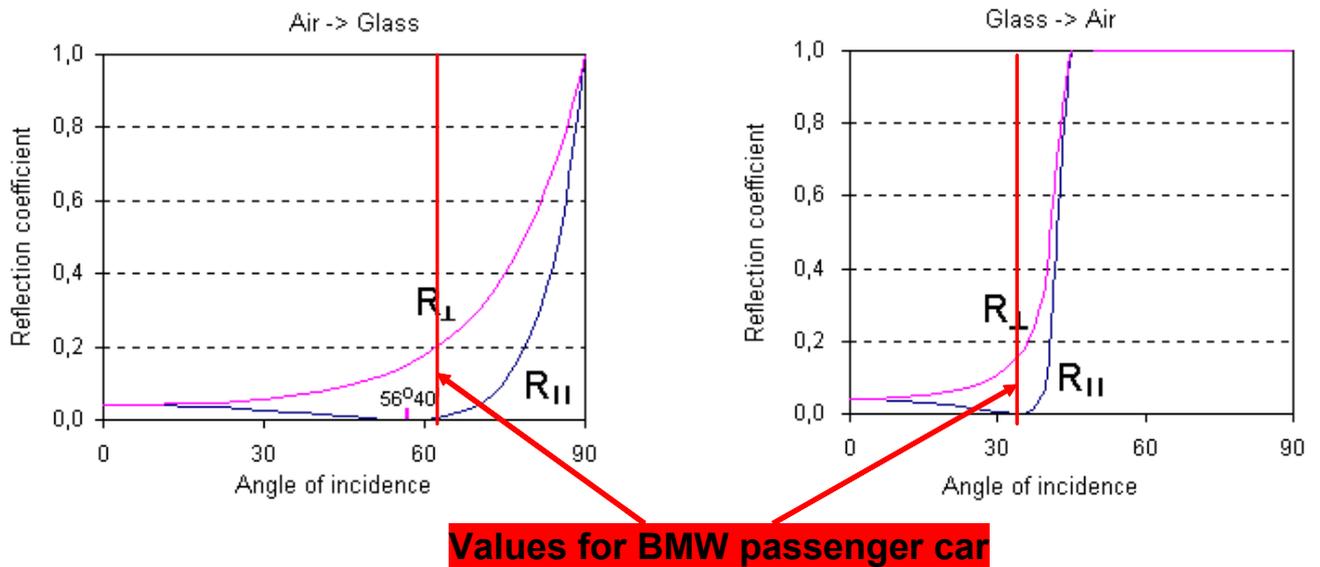
$$R_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_1 - \theta_3)}{\sin^2(\theta_1 + \theta_3)}$$

$$T_{\perp} = \frac{\sin 2\theta_1 \sin 2\theta_3}{\sin^2(\theta_1 + \theta_3)}$$

Bei Anwendung dieser Formeln auf eine Grenzschicht Luft-Glas bzw. Glas-Luft ergeben sich die in Abbildung 11 dargestellten Verläufe. Aus der Grafik ist ersichtlich, dass bei paralleler Polarisation in den sogenannten Brewsterwinkel eine Nullstelle der Reflexion auftritt. Bei senkrechter Polarisation nimmt der Reflektionskoeffizient stark mit dem Einfallswinkel zu bis zur Totalreflektion.

Dies führt zu folgendem wichtigen Ergebnis für die Einbaulage der Beleuchtungseinheit:

- Da der Einfallswinkel für die vom Automobilanwender definierte Scheibenneigung in der Nähe des Brewsterwinkel liegt, muss für MIDIAS die Polarisationsebene der Laserbeleuchtung parallel zur Einfallsebene liegen.
- Im Vergleich zum UseRCams Modul müssen die einzelnen Laserdioden um 90° gedreht werden.



Brewster's angle BR

$$\theta_{BR} = \arctg(n_2/n_1), n_1 < n_2$$

Total internal reflection TIR

$$\theta_{TIR} = \arcsin(n_2/n_1), n_1 > n_2$$

Abbildung 11: Reflektionsverhaltens in Abhängigkeit vom Neigungswinkel der Scheibe

4.3.3.3 Messungen an Fahrzeugscheibe

Zur Absicherung der theoretischen Betrachtungen wurden Messungen mit unterschiedlicher Polarisationsrichtung des Lasers bzgl. der Eintrittsebene durchgeführt. Dabei wurde der Sensor gemäß Abbildung 12 hinter 28° geneigten Scheibe aufgebaut und der von einem Objekt reflektierte Lichtpuls mit dem 3D-CMOS Sensor jeweils mit und ohne Scheibe gemessen. Der Lichtpuls durchläuft somit zweimal die Windschutzscheibe mit insgesamt 4 Grenzflächen.

Bei Anwendung obiger Formeln ergeben sich die folgenden Werte für die Sensorsignale (relative zur Situation ohne Scheibe) bei paralleler bzw. senkrechter Polarisation.

$$T_{\parallel} = 98\%;$$

$$T_{\perp} = 42\%$$

Die Polarisationsrichtung des Lasers hat somit bei der betrachteten Scheibenneigung sehr großen Einfluss auf die Bestrahlungsstärke am Sensor und muss im optischen Design entsprechend berücksichtigt werden.

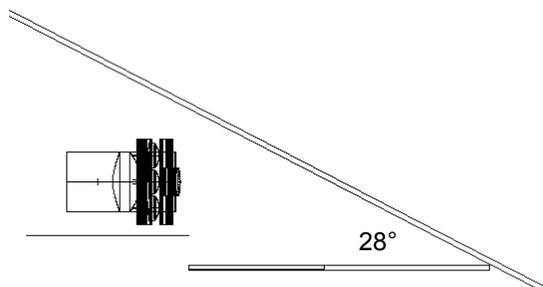


Abbildung 12: Einbaugeometrie am Versuchsträger

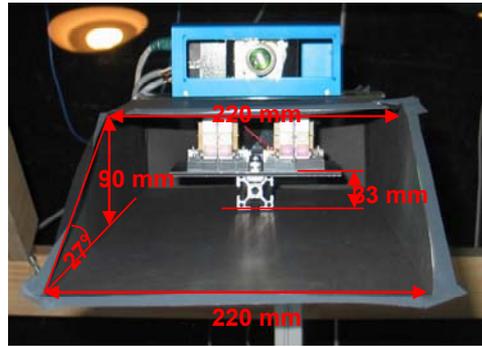
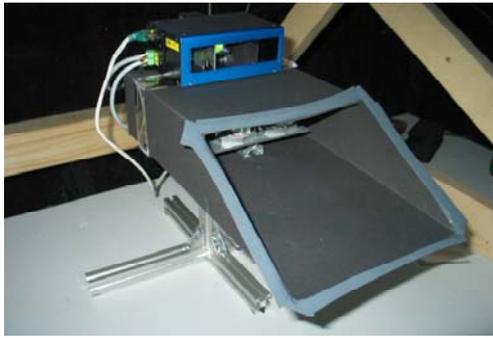


Abbildung 13: Versuchsaufbau zur Messung der Scheibentransmission

Im Versuchsaufbau ergaben sich nachfolgende Messwerte, dargestellt ist das mittlere Zeilenprofil des 64x8 Pixel Sensors.

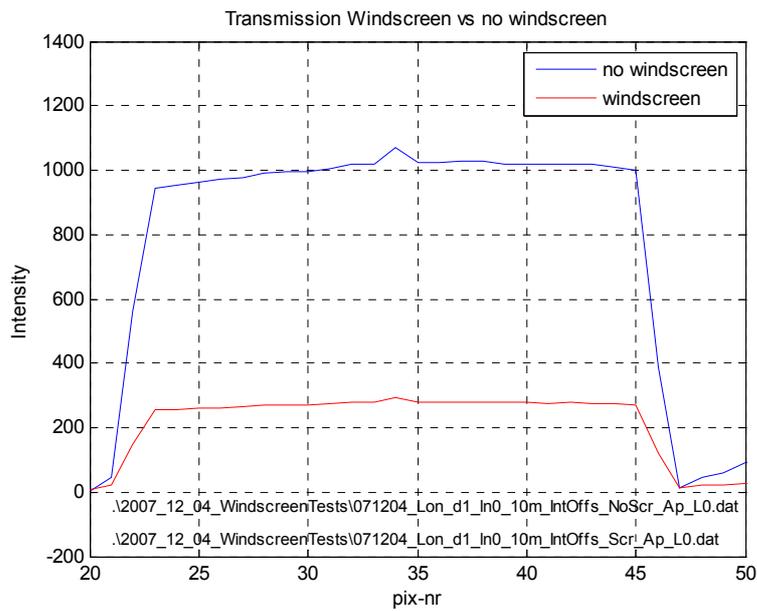


Abbildung 14: Sensorsignale bei *senkrechter* Polarisierung der Laserbeleuchtung

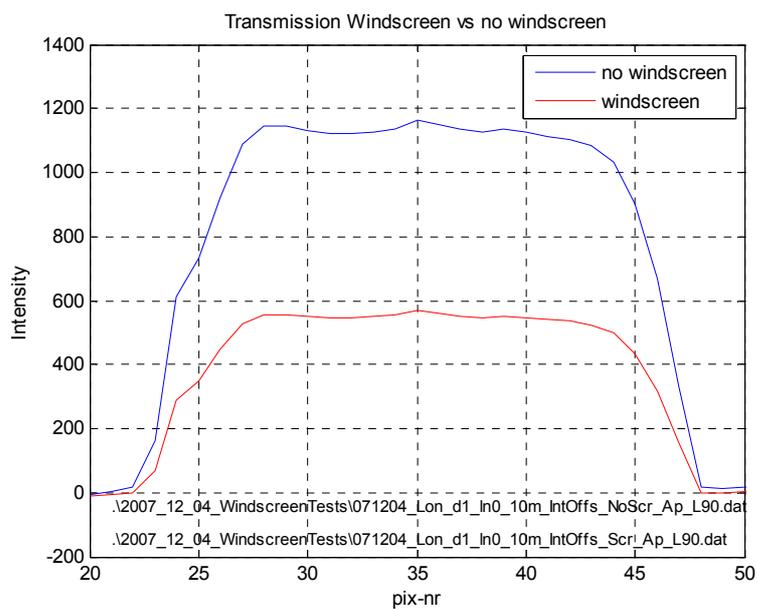


Abbildung 15: Sensorsignale bei *paralleler* Polarisierung der Laserbeleuchtung

Sowohl bei senkrechter als bei paralleler Polarisierung liegen die Werte somit unter den theoretischen Transmissionswerten, vermutlich aufgrund zusätzlicher Absorption in der Windschutzscheibe, über deren optischen Eigenschaften vom Hersteller jedoch keine Daten zur Verfügung gestellt werden konnten.

4.4 AP3.2: 3D CMOS Sensor - Chip

Die Evaluierung des UseRCams Demonstrators im Fahrzeugeinsatz ergab eine Reihe von Anforderungen an das Systemdesign und die Entwicklung der einzelnen Systemkomponenten für Anwendungen im Traffic- Bereich:

- Extrem hohe Dynamikanforderung an die optischen Komponenten
- Hohe Übersprechdämpfung um Fehlmessungen außerhalb des spezifizierten Dynamikbereiches zu vermeiden
- Möglichst geringes und ausschließlich systematisches Temperaturverhalten
- Grundlegende Analysen dieser Kenngrößen müssen schon im Design- und Entwicklungsprozess eingeplant werden:
 - Simulationen während der Designphase
 - Einfluss des Umgebungsbedingungen

4.4.1 Charakterisierung des 64x8 Pixel CMOS Arrays

4.4.1.1 Übersprechen (Crosstalk)

Die in den Fahrzeuganwendungen auftretende Szenendynamik kann den spezifizierten Wert für den 3D-CMOS Sensor zum Teil erheblich überschreiten. So führen retroreflektierende Flächen, die beispielsweise an Verkehrszeichen, Rücklichtern und Nummernschildern zu finden sind, zur Sättigung des Sensorsignals. Eine Berechnung des Abstandes nach dem MDSI-Verfahren ist damit nicht mehr möglich (aber auch nicht notwendig). Allerdings dürfen die übersteuerten Pixel nicht zu einem Übersprechen und damit zu Fehlmessungen auf anderen Pixel führen.

Das Verhalten des 64x8 Pixel CMOS Arrays bei diesen Szenen wurde in 2 Versuchsaufbauten quantitativ untersucht.

Übersprechverhalten bei retroreflektierenden Szenen

Ein ebenes Objekt wird in einer Entfernung von 6 m vor den Sensor aufgestellt. In halber Entfernung wird ein Retroreflektor variabler Größe am Rande des Gesichtsfeld der Kamera positioniert und die vom Sensor gemessenen Intensitäts- und Abstandsdaten eines Punktes auf der Ebene gemessen.

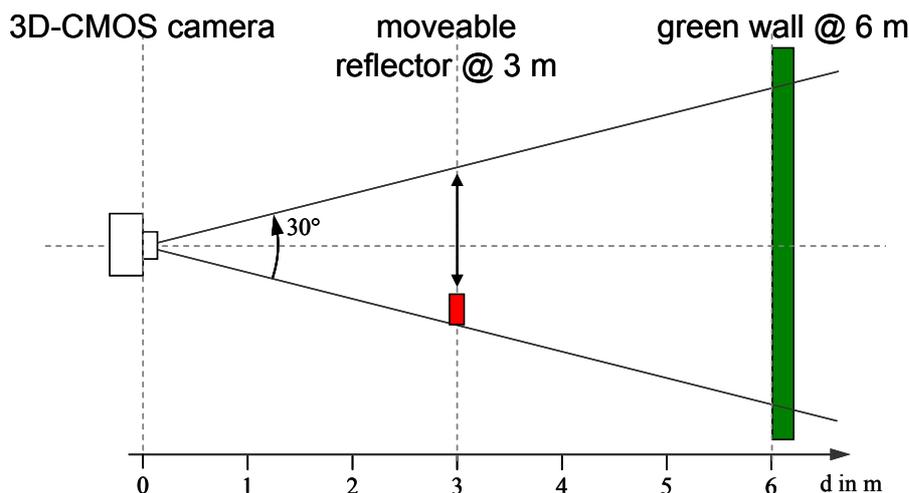


Abbildung 16: Versuchsaufbau zur Messung des Übersprechverhaltens

Wie im Kapitel 4.5.1 ausgeführt, ergeben sich für das MDSI- Laufzeitverfahren prinzipiell 2 Möglichkeiten für die zeitliche Puls-Shutter Konstellation.

Nachfolgende Abbildung zeigt die Änderung der Sensorintensität in Abhängigkeit von der Fläche des Retroreflektors für die beiden Möglichkeiten.

Aus den Messungen ergeben sich folgende Auswirkungen auf die Laufzeitberechnung bzw. Anforderungen an den Sensor:

- Das beim MDSI-3 Verfahren verwendete Puls-Shutter-Timing verursacht einen signifikanten Messfehler der Intensität, der je nach Szenenintensität und –abstand in einem Abstandsfehler transponiert wird.
- Um die Genauigkeitsvorteile des MDSI-3 Verfahrens benutzen zu können, muss daher das Dynamikverhalten des 3D-CMOS Chips verbessert werden.

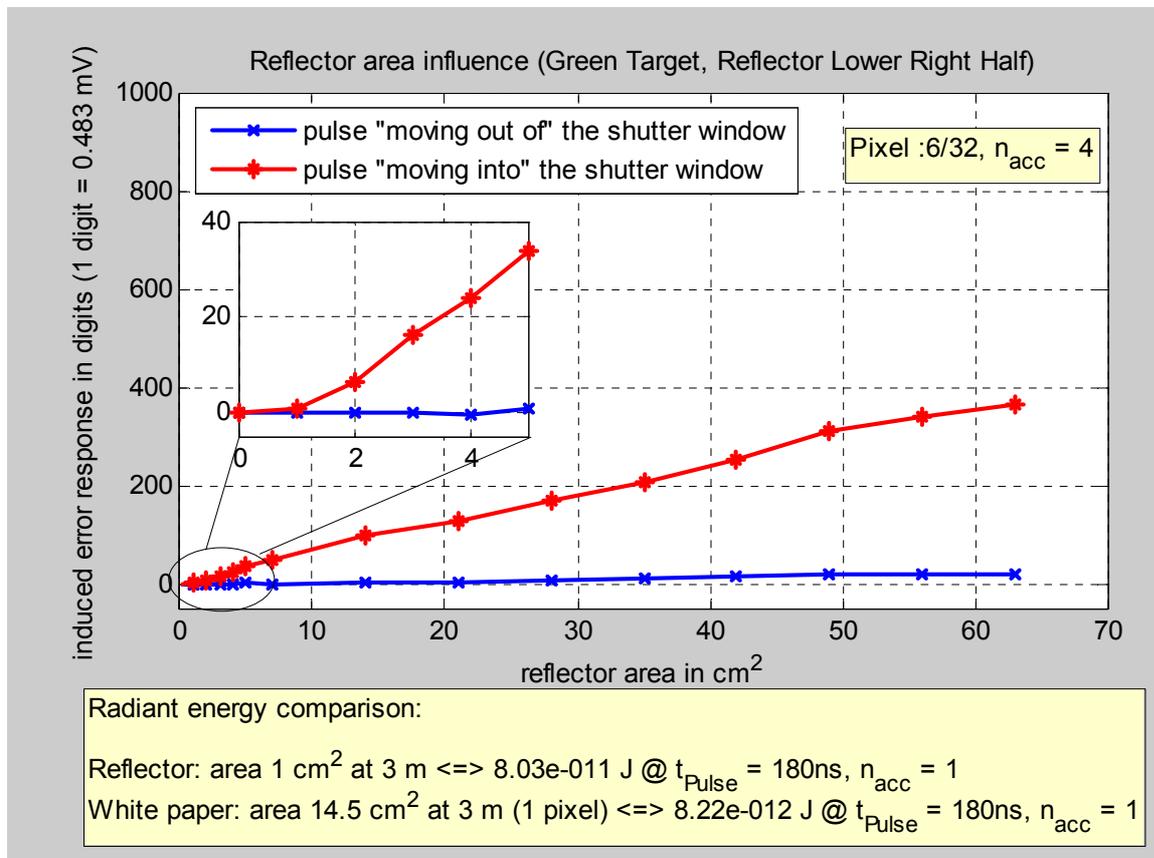


Abbildung 17: Einfluss eines Retroreflektors

Übersprechverhalten bei direkter Bestrahlung des Chips

Um das elektrische Übersprechen auf dem Chip von optischem Übersprechen innerhalb der Abbildungsoptik zu trennen wurde in einem weiterem Versuchsaufbau das Licht in eine Faser eingekoppelt und die auskoppelnde Faserendfläche präzise auf ein Pixel abgebildet. Damit konnten definierte Randbedingungen für die Beleuchtung bzw. Überstrahlung einzelner Pixel auf dem Chip geschaffen werden.. In Abbildung 18 wurde das Pixel 63,8 (im Bild rechts unten) beleuchtet und man kann deutlich erkennen, dass das Übersprechen des belichteten Pixels 63 in Zeile 8 auf Pixel in Zeile 5 und 6 in vertikaler Richtung stärker ist als auf das unmittelbar benachbarte Pixel in Zeile 7.

Eine begleitende Sensorsimulation lieferte die Erkenntnis, dass überschüssige Ladungen nicht durch einen Guardring abgefangen wurden und dadurch dieses Übersprechverhalten erzeugte.

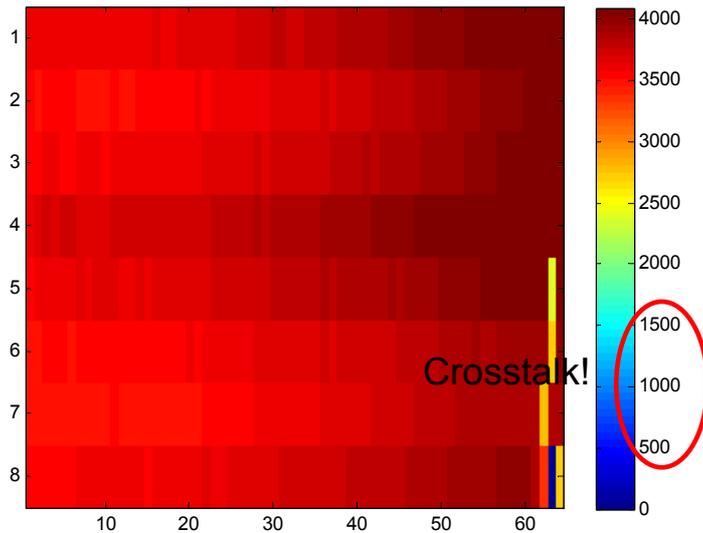


Abbildung 18: Crosstalk bei Bestrahlung eines einzelnen Pixels

4.4.1.2 Temperaturverhalten

Gewöhnlich zeigen CMOS-Sensoren ein sog. „Fixed Pattern Noise“, welches ohne Belichtung u.a. aufgrund der Streuung von Schaltschwellen der Transistoren der einzelnen Pixel entsteht, d.h. bereits bei einer Bildaufnahme im Dunkeln ist ein Bildmuster zu beobachten. Im Prinzip lässt sich das „Fixed Pattern Noise“ durch Offsetkalibrierung korrigieren wobei bei geringem Rauschen auch ein geringer Dynamikverlust des Sensors entsteht. Wenn jedoch das „Fixed Pattern Noise“ hoch ist, eine Temperaturabhängigkeit aufweist und zudem durch Mittelungsprozesse (Akkumulation) verstärkt wird, ergeben sich gravierende Einschränkungen bei der Einsetzbarkeit des Sensors. Abbildung 19 zeigt in Falschfarbendarstellung die Drift des Offsets bzw. „Fixed Pattern“ bei einem Temperaturhub von 25K. Deutlich erkennt man eine Drift in Spaltenrichtung wobei eine Symmetrie zwischen den beiden Chiphälften (Der USERCAM-Chip ist aus zwei identischen Teilchips zusammengesetzt). Insofern verhalten sich die einzelnen Chips systematisch und vorhersehbar, jedoch ist der gesamte Offset mit bis zu 30 % des Dynamikumfangs der Verarbeitungselektronik sehr hoch, was zu einer Einschränkung des Dynamikbereichs führt. Dies muss bei folgenden Designgeneration deutlich verbessert werden.

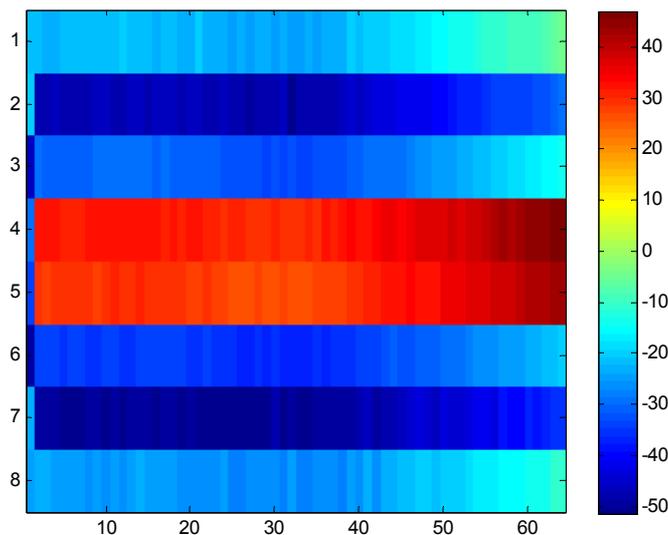


Abbildung 19: Sensoroffset

Das Temperaturverhalten des Sensors beeinflusst die Qualität der Abstandswerte, da prinzipbedingt Laufzeit- bzw. Entfernungsmessung über Spannungsmessungen erfolgen. Die Auswirkung der Off-

setdrifts auf den gemessenen Abstandes ist in Abbildung 20 graphisch aufgetragen. Dabei ist U2 die Spannung des Langzeitshutters und damit ein Maß für die Bestrahlungsstärke am Sensor.

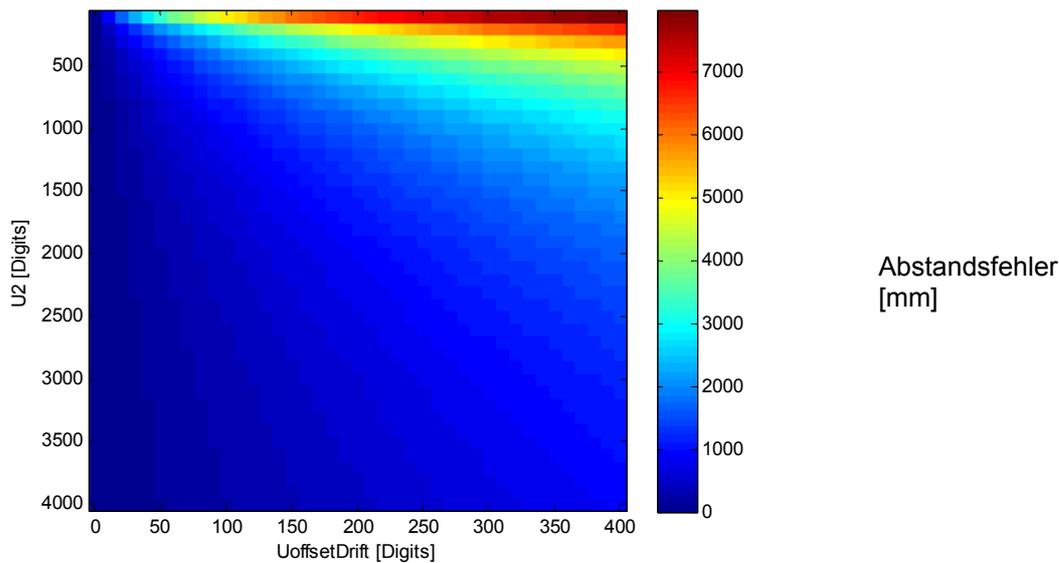


Abbildung 20: Abstandsfehler in Abhängigkeit vom Offsetdrift und Sensorsignal

Deutlich sieht man, dass bei hohen Offsetdriften (300-400 Digits) und gleichzeitig niedrigen Signalstärken ein Abstandsfehler im Bereich mehrerer Meter entstehen kann. Da die beobachteten Temperatureffekte kein systematisches Verhalten zeigen, kann das Problem durch Temperaturkalibrierung nicht behoben werden.

Es ist daher ganz entscheidend für das Chipdesign, dass diese temperaturabhängigen Effekte vermieden werden. Diesbezügliche Designregeln müssen strikt beachtet werden.

4.5 AP3.3: 3D CMOS Sensor – Optik, Algorithmen, Systemintegration

4.5.1 3D-Algorithmik

Zielsetzung ist die optimierte Anpassung der Time-of-Flight- Algorithmen an die Systemkomponenten. Dies bedeutet, dass nach Qualifizierung der Systemkomponenten die Parameter des MDSI- Algorithmus (u. a. Länge des Lichtpulses, relative zeitliche Lage des Integrationsfensters, Kalibrierparameter) für die optimale Performance theoretisch und experimentell ermittelt und durch umfangreiche Tests untermauert werden. Wesentlich hierbei ist auch die Betrachtung des optimalen Arbeitspunkts der Detektorelektronik in Hinblick auf sein Rauschverhalten. Die hierbei erzielten Ergebnisse werden bei der CMOS-Chipentwicklung und bei der Programmierung der Ansteuerungs- Firmware (FPGA) umgesetzt.

4.5.1.1 Varianten des MDSI-Verfahren

Das MDSI-Verfahren zur Bestimmung der Pulslaufzeit basiert auf Beleuchtung der gesamten Szene mit extrem kurzen Laserpulsen und der Erfassung des von der Szene reflektierten Pulses mit einem CMOS Sensor-Array, dessen Integrationsfenster (Shutter) synchron zum Aussenden des Laserpulses geöffnet werden. Dadurch kann die Flugzeit (Time-of-Flight) des Pulses und damit der Abstand zum Szenepunkt berechnet werden. Dabei können folgende zeitliche Puls- Shutter- Konfigurationen unterschieden werden:

- Die Überlappung von Laserpuls und Shutter nimmt mit zunehmender Entfernung ab, d.h. der reflektierte Pulse bewegt sich mit zunehmender Entfernung aus dem Integrationsfenster
- Die Überlappung von Laserpuls und Shutter nimmt mit zunehmender Entfernung zu, d.h. der reflektierte Pulse bewegt sich mit zunehmender Entfernung in das Integrationsfenster hinein
- Die Überlappungszeit ist unabhängig von der Entfernung, das Sensorsignal ist ein Maß für die Beleuchtungsstärke auf dem Sensor

Zur Abstandsbestimmung sind beim gegenwärtigen Sensorprinzip mindestens 2 Messungen notwendig, eine Messung gemäß Konfiguration a) bzw. b) und eine Messung gemäß Konfiguration c).

Die nächsten beiden Abbildungen zeigen 2 Mögliche Realisierungen des MDSI- Verfahrens. Beim MDSI-1 Verfahren wird die zeitliche Lage von Laserpuls und Shutter gemäß Konfiguration a) und c) gewählt. Aus den beiden Messwerten U_1 und U_2 berechnet sich der Abstand für jedes Pixel zu

$$d = \frac{c}{2} (T_1 - T_d - T_{PW} \frac{U_1}{U_2})$$

Mit

- c Lichtgeschwindigkeit
- T_1 Shutterzeit Shutter1
- T_d Pulsdelay
- U_1 Sensorsignal für Shutter1
- U_2 Sensorsignal für Shutter2

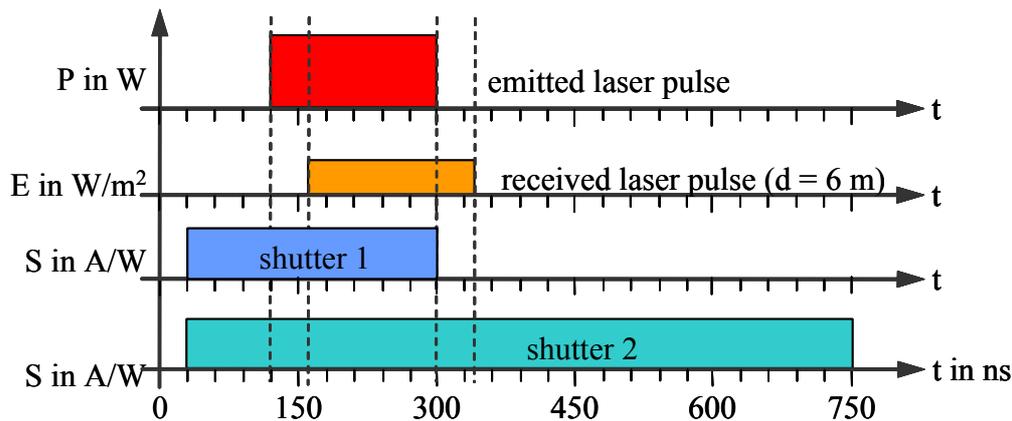


Abbildung 21: Timing MDSI-1 Verfahren

Beim MDSI-3 Verfahren wird die zeitliche Lage von Laserpuls und Shutter gemäß Konfiguration a) und b) gewählt. Der notwendige Referenzwert für die Szenenintensität ist die Summe der beiden Messungen. Damit berechnet sich der Abstand gemäß:

$$d = \frac{c}{2} (T_1 - T_d - T_{PW} \frac{U_1}{U_1 + U_2})$$

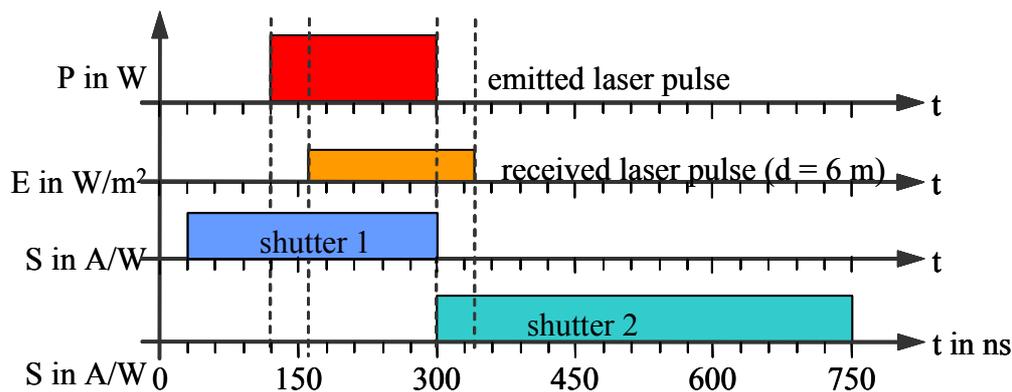


Abbildung 22: Timing MDSI-3 Verfahren

4.5.1.2 Vergleich der Algorithmen

Das Rauschen der digitalisierten Ausgangswerte der MDSI- Algorithmen bestimmt im Wesentlichen die erzielbare Abstandsauflösung bzw. die Genauigkeit der Abstandswerte. Daher kann aus dem statistischen Rauschen der Sensorsignale σ_U mit Hilfe der für die Fehlerfortpflanzungsgesetze bekannten Rechenregeln der statistische Abstandsfehler σ_d abgeleitet werden.

MDSI-1

$$\sigma_d \approx \frac{c}{2} \cdot T_{PW} \cdot \frac{1}{U_2} \cdot \sqrt{\left(1 + \frac{U_1^2}{U_2^2}\right) \cdot \sigma_U}$$

MDSI-3

$$\sigma_d \approx \frac{c}{2} \cdot T_{PW} \cdot \frac{1}{(U_1 + U_2)^2} \cdot \sqrt{(U_1^2 + U_2^2) \cdot \sigma_U}$$

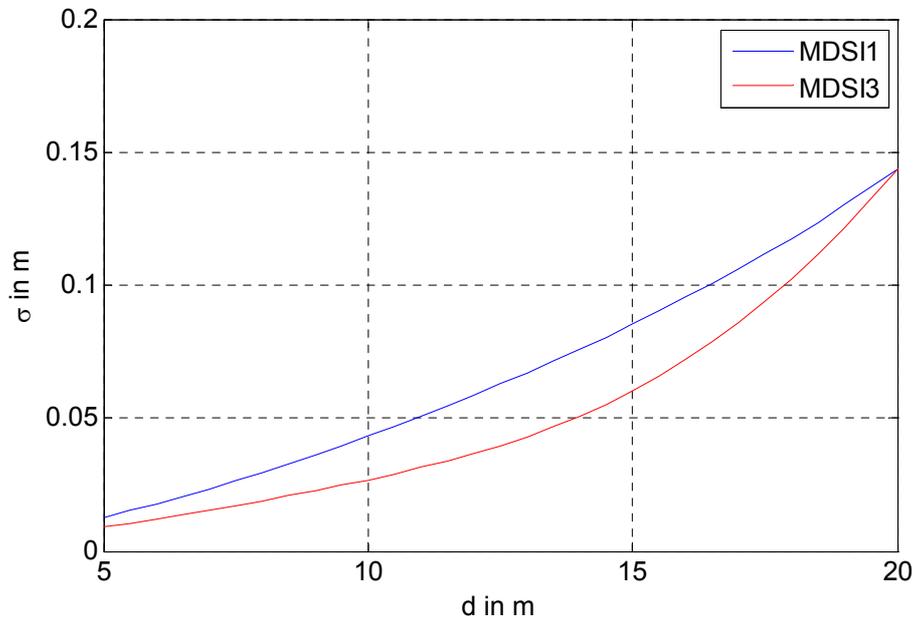


Abbildung 23: Statistische Messfehler MDSI

Wie aus obiger Abbildung zu sehen ist weist das MDSI-3 Verfahren vor allem im mittleren Bereich des gesamten Messbereiches eine geringeres Entfernungsruschen auf und ist somit vorzuziehen.

Beim UseRCams Sensor führen Diffusionsprozesse bei Eintreffen des Lichtpulses vor dem Öffnen des Shuttters allerdings zu zusätzlichen Störsignalen im Ausgangssignal, so dass das MDSI-3 Verfahren nicht eingesetzt werden kann.

4.5.2 Optische Komponenten für 3D-CMOS Sensor

4.5.2.1 Sensoroptik

Für Time-of-Flight- Anwendungen sind die Anforderungen an die eingesetzten optischen Komponenten aufgrund der hohen Szenendynamik in Hinblick auf Streulichtunterdrückungen und Reflexionen an Grenzflächen wesentlich höher als bei gewöhnlichen Objektiven. Deshalb wurde ein Spezialobjektiv entwickelt (Abbildung 24), welches unter Berücksichtigung obiger Gesichtspunkte ein extrem gutes Kontrastabbildungsvermögen aufweist. Es wurde darauf geachtet, dass möglichst wenig Einzellinsen verwendet wurden und jede Linse mit speziellen Antireflexschichten beschichtet wird. Abbildung 25 zeigt den Intensitätsabfall von drei Bildpunkten über den Ort. Man erkennt deutlich, dass in einem Abstand von ca. 70 µm (dies entspricht ungefähr der halben Pixelbreite auf dem Sensorchip) von der Fokusmitte bereits ein Intensitätsabfall auf 1/10000 erfolgt ist. Somit ist weitgehend ausgeschlossen, dass Abstandsmessfehler durch optisches Übersprechen in der Optik zustande kommen.

Das Objektiv mit 3 Linsen wurde bei Siemens mit dem Entwurfstool ZEMAX berechnet und beim Fraunhofer Institut für Optische Komponenten und Systeme hergestellt. Die Haupteigenschaften des Objektivs sind eine sehr hohe Apertur und ein hoher Dynamikbereich, um den Anforderungen der Szenendynamik Rechnung zu tragen.

Parameter	Value
Focal length	10.8 mm
f-number	1.0

Tabelle 2: Kenngrößen 3D-CMOS Objektiv

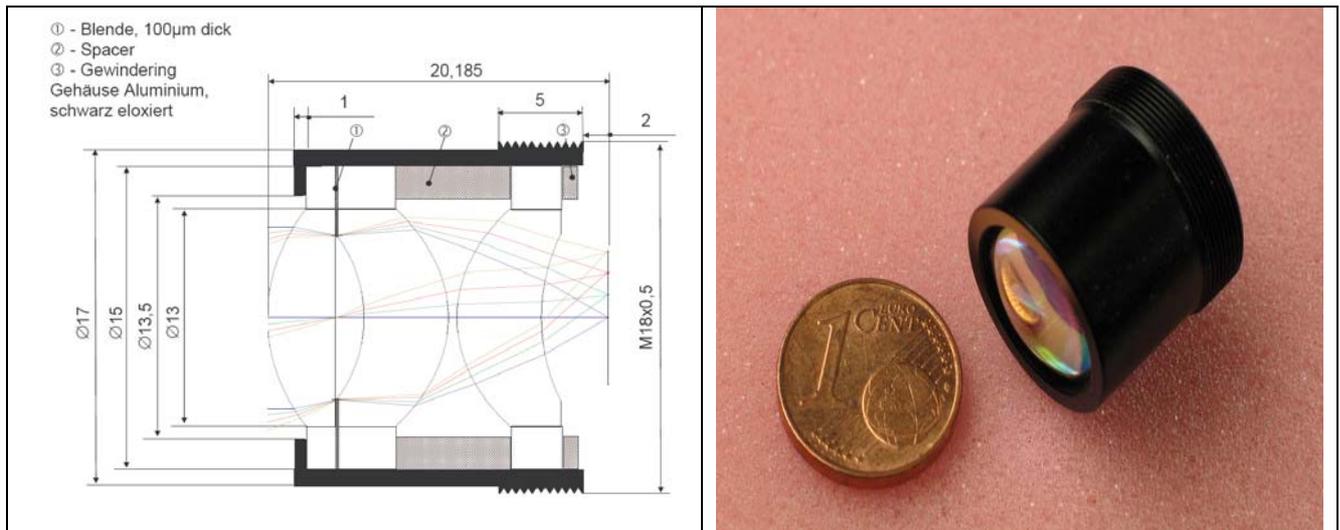


Abbildung 24: Bildgebende Optik für 3D-CMOS Sensor

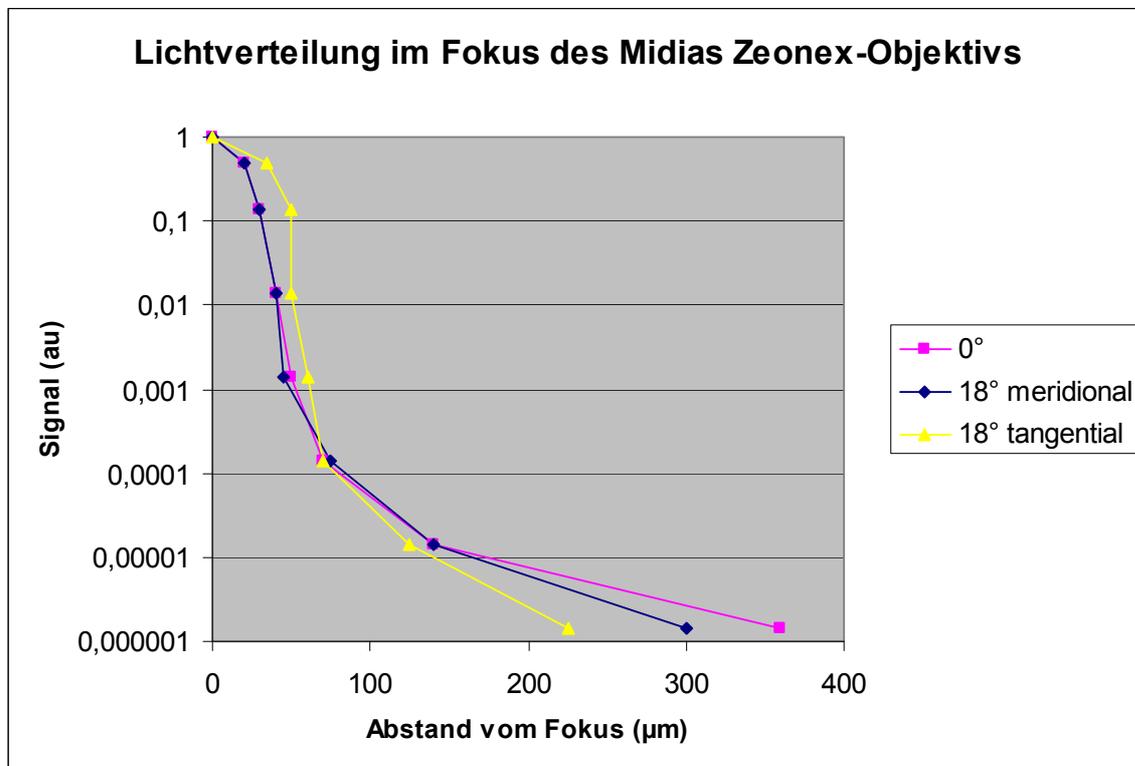


Abbildung 25: Gemessene Lichtverteilung für drei „Foki“ des Midias Objektivs

4.6 AP5: Fusion auf Pixelebene

4.6.1 AP5.1: Hardware Architektur

Die Hardware Architektur wurde nach Abschluss der theoretischen Untersuchungen bezüglich der Bandbreiten- und Leistungsanforderungen der 2D/3D-Datenfusion endgültig festgelegt. Das System besteht aus dem Kamerakopf, der die beiden Sensoren (2D / 3D), die aktive Laserbeleuchtung für den 3D-CMOS Sensor sowie die Elektronik zur Ansteuerung der Sensoren enthält, und der Fusionsbox zur Verarbeitung der Sensordaten (Abbildung 26). Der Kamerakopf enthält ein FPGA, das die Schnittstellen zu den beiden Sensoren und zum Lasermodul sowie die Berechnung des Abstandes nach dem MDSI- Verfahren implementiert. Er wird im Rückspiegelbereich hinter der Windschutzscheibe montiert (Abbildung 27). Aufgrund der extremen Temperaturanforderungen wurde zur Kühlung des Lasermoduls eine Heatpipe integriert.

Die Rohdaten des Kamerakopfes werden über den Automotive Pixel Link Bus (APIX) zur Fusionsbox übertragen und dort weiter verarbeitet. APIX ist ein High-Speed-Bussystem für die Automobiltechnik, mit dem große Datenmengen in Hochgeschwindigkeit übertragen werden können. Die Übertragungsrate für die Übertragung der Video- und Peripheriedaten für Displays und Kamera-Anwendungen reicht bis zu 1 Gbit/s.

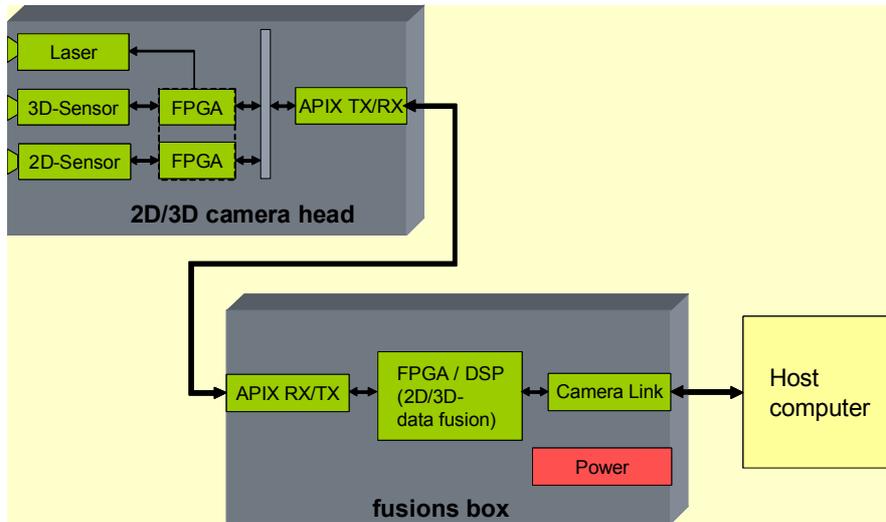


Abbildung 26: MIDIAS Hardware Architektur

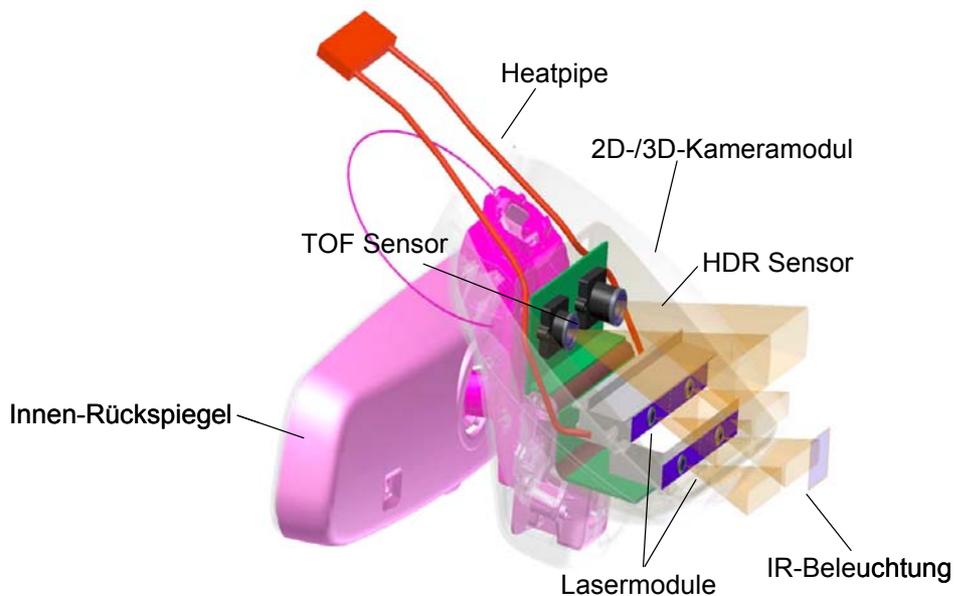


Abbildung 27: Kamerakopf Montage hinter der Windschutzscheibe
 Nachfolgende Abbildung zeigt den Datenfluss in der MIDIAS-Kamera.

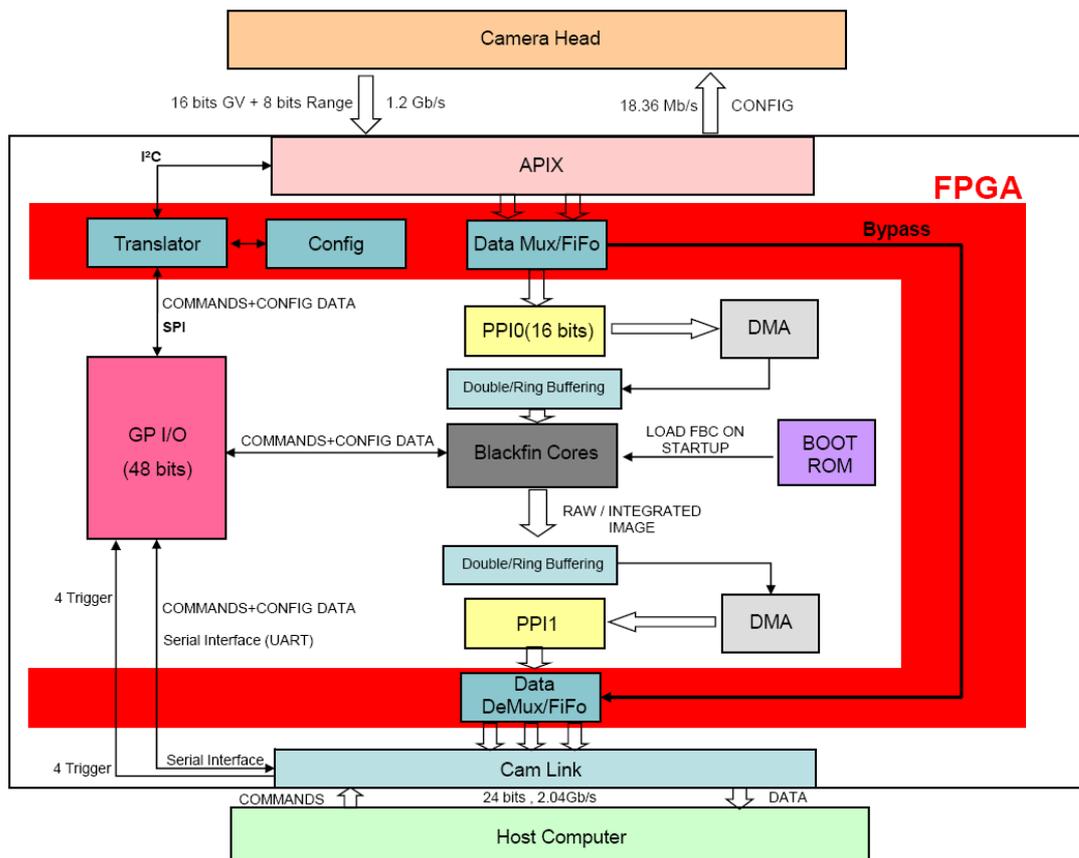


Abbildung 28: Datenfluss MIDIAS

In der Fusionsbox gewährleistet ein leistungsfähiger Signalprozessor (DSP) sowie optionale FPGA-Unterstützung die erforderliche Verarbeitungsleistung. Als DSP wurde der Prozessor ADSP-BF561 mit Dual Core Blackfin Prozessor von Analog Devices ausgewählt. Blackfin ist ein Mikrocontroller, dessen Kern von den Unternehmen Analog Devices und Intel entwickelt wurde. Er stellt eine Kombination aus einem 32-Bit-RISC-Prozessor und einem 16-Bit-Festkomma-DSP mit zwei MAC-Einheiten (Multiply-Accumulate) mit SIMD-Fähigkeit (Single Instruction Multiple Data) dar (Abbildung 29). Dank umfangreichen Peripherieblöcken liegen die Einsatzbereiche nicht nur im Bereich von Multimediaanwendungen in mobilen Geräten wie digitalen Foto- und Videokameras, sondern auch in rechenintensiven medizinischen und industriellen Anwendungen. Im Automobilbereich findet man Blackfin-Prozessoren hauptsächlich in Fahrerassistenzsystemen und in Infotainment-Applikationen.

Die Taktrate des Prozessorkerns beträgt 600 MHz. Der Prozessor besitzt einen 328 kBytes großen internen L1-Speicher, welcher sich auch als Cache-Speicher verwenden lässt. Das Rechenwerk (ALU) besteht aus zwei getrennten, parallelen Einheiten mit zwei 40 Bit breiten Akkumulatoren. Darüber hinaus bietet der Blackfin die Möglichkeit sogenannter „Hardwareschleifen“, womit Schleifen ohne Rechenzeit für den Schleifenzähler realisiert werden können. Dabei wird über einen speziellen Maschinenbefehl ein Schleifenregister („Zero-overhead Loop Registers“) mit einer Anfangs-, einer Endadresse und einem Schleifenzähler geladen. Die beliebigen Assemblerbefehle zwischen den beiden Adressangaben werden so oft durchlaufen, wie es im Schleifenregister angegeben ist ohne dass bedingte Sprungbefehle notwendig sind. Damit ist möglich, effizient Schleifen zu implementieren, ohne dass von der Software ein Schleifenzähler weitergezählt und nachfolgend auf Erreichen der Abbruchbedingung überprüft werden muss. Dies ist insbesondere bei der Implementierung von kurzen Schleifen im Bereich der Algorithmen aus der digitalen Signalverarbeitung, wie sie typischerweise digitale Filter oder die schnellen Fourier-Transformation darstellen, ein Geschwindigkeitsvorteil.

Darüber hinaus umfasst die Architektur umfangreiche Ein-Ausgabeschnittstellen wie synchrone serielle Ports, so genannte SPORTs für den direkten Anschluss von Analog-Digital-Umsetzer und Digital-Analog-Umsetzer, UARTs, Echtzeituhr, einen SDRAM-Controller und diverse Ein-Ausgabeanschlüsse. Für die MIDIAS Kamera ist dabei die synchrone, 16 Bit breite PPI-Schnittstelle entscheidend, die als Interface für die beiden Sensoren verwendet wird. Die Rohdaten vom Sensorkopf werden über den APIX Receiver und ein zusätzliches FPGA direkt mit den parallelen Interfaces (PPI) des Prozessors verbunden (Abbildung 28). Mit dem zusätzlichen FPGA kann eine Vor- und Nachbearbeitung der Bilddaten durchgeführt werden, z.B. Formatierung und Region of Interest Selektion.

Als Entwicklungssystem für den Blackfin wird von Analog Device das Softwarepaket VisualDSP++ verwendet. Als Entwicklungsschnittstelle und zum Programmieren der Hardware ist ein JTAG-Anschluss vorhanden.

Als Ausgabeschnittstelle der fusionierten Daten wurde CameraLink[®] definiert.

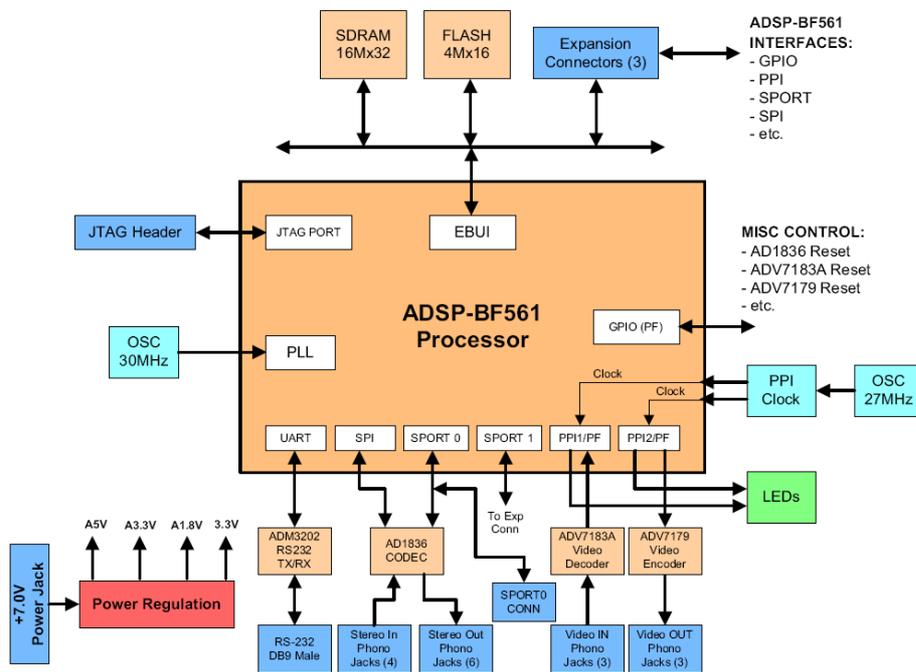


Abbildung 29: Blackfin Architektur

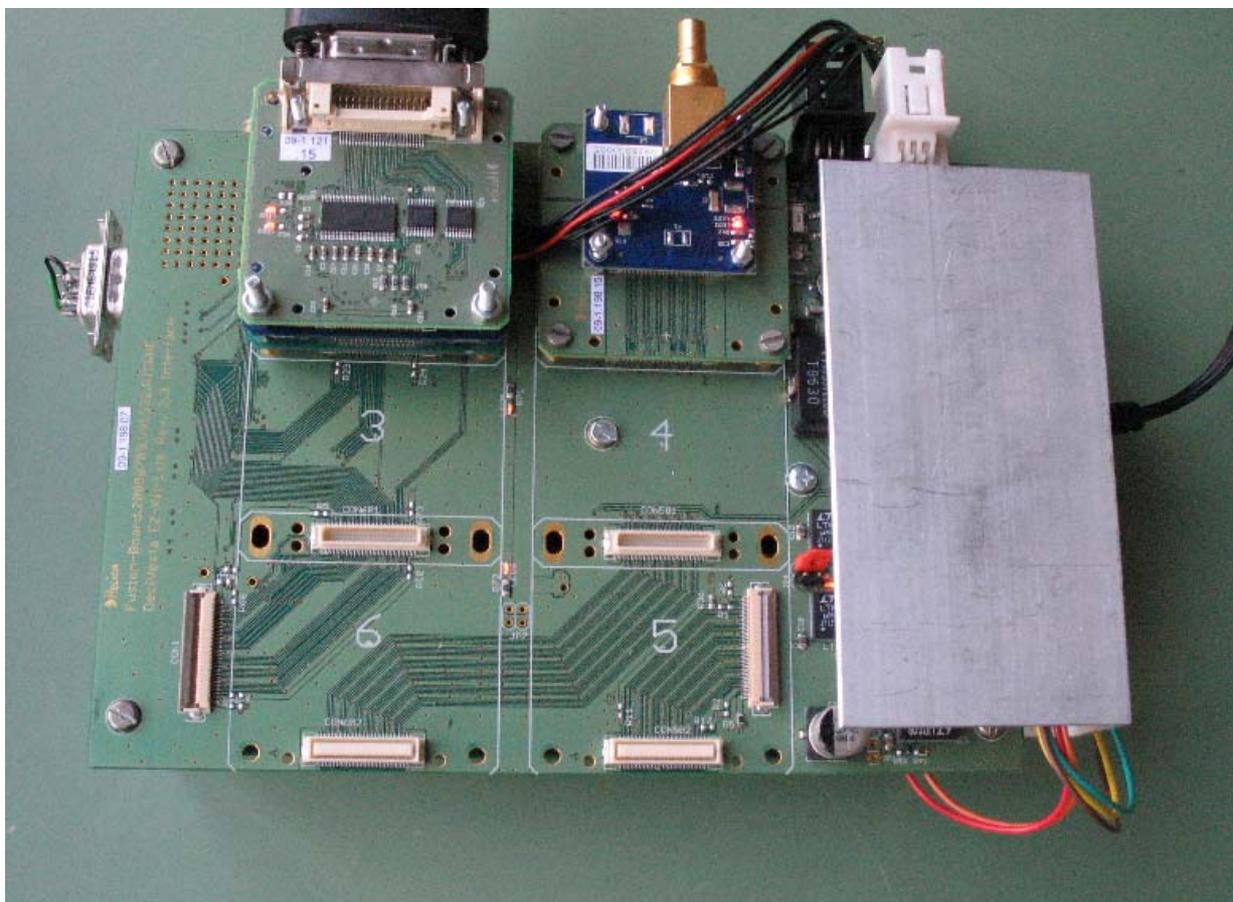


Abbildung 30: Fusionsbox (ohne Gehäuse)

4.6.2 AP5.2: Aufbereitung der Algorithmen zur Datenfusion

Zur Vorbereitung der Portierung der Fusionsalgorithmen auf den DSP der Fusionsbox wurden die einzelnen Verarbeitungsböcke hinsichtlich Speicherbedarf und Rechenleistung analysiert (Abbildung 31). Bei dynamischer Berechnung der Voronoi-Zerlegung wird eine Rechenleistung von ca. 470 MFPO (Mega Floating Point Operations) benötigt. Der ursprüngliche rein FPGA basierte Ansatz zur Fusion wurde zugunsten der im vorherigen Ansatz beschriebenen Architektur aufgegeben, da die Segmentierung mittels eines „Region Growing“ Ansatzes aufgrund der eingeschränkten Parallelisierungsmöglichkeit nicht gut für eine Implementierung auf einem FPGA geeignet ist. Allerdings ermöglicht die kompakte Anordnung der beiden Kamerasysteme im Sensorkopf im geringen und festen Abstand zueinander die Anwendung eines statischen Voronoi-Gitters anstelle des dynamischen Modells. Die hohen Anforderungen der 2D/3D-Datenfusion konnten dadurch wie in Abbildung 32 gezeigt von 470 MFPO auf 2 MFPO erheblich reduziert werden. Das statische Voronoi-Gitters wird in einer Lookup Tabelle beschrieben, die in einem Kalibrierungsvorgang offline erstellt wird.

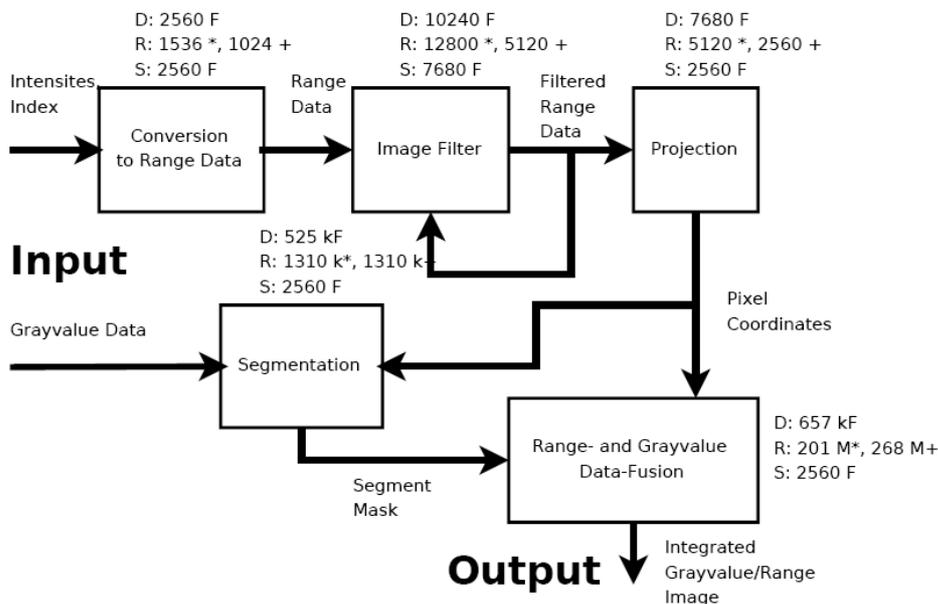


Abbildung 31: Funktionsblöcke der 2D/3D-Datenfusion

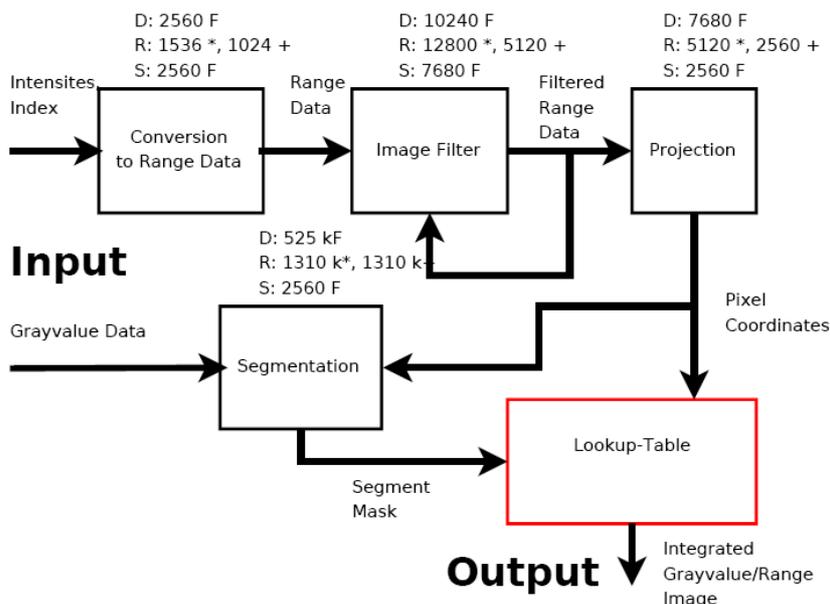


Abbildung 32: Datenfusion bei statischer Voronoi-Zerlegung

4.6.3 AP5.3: Hardwarenahe Software

Ziel der Datenfusion ist aus den 2D- und 3D Rohdaten ein hoch aufgelöstes Gesamtbild zu berechnen, das im gemeinsamen Gesichtsfeld der beiden Sensoren für jeden Grauwertpixel einen Abstandswert extrapoliert.

Das gemeinsame Gesichtsfeld wird durch die beiden Sensoren und deren Abbildungsoptiken definiert:

3D-Sensor

Fokusslänge: 10,8 mm
Pixelanzahl: 64 x 8
Pixeldimension: 0,13 mm x 0,3 mm

2D-Sensor

Fokusslänge: 5.7 mm
Pixelanzahl: 752 x 480
Pixeldimension: 0,006 mm x 0,006 mm

Aus den geometrischen und optischen Parametern ergibt sich ein gemeinsames Gesichtsfeld der beiden Sensoren von $42^\circ \times 12,7^\circ$, mit einer Auflösung von 752 x 220 Pixel (Abbildung 33).

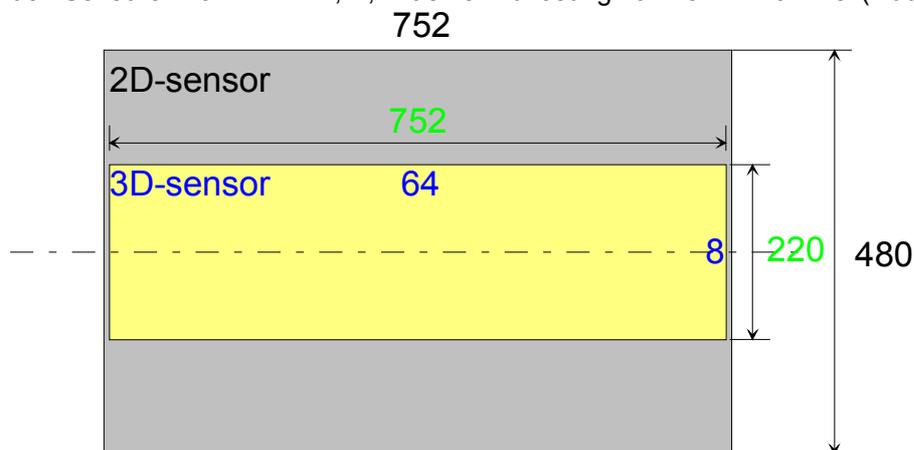


Abbildung 33: Kameragesichtsfelder

Aus Effizienzgründen werden die Bilder im 128 kByte großen L2 Cache des Blackfin bearbeitet. Die Rohdaten werden dazu mittels DMA (direct memory access) Zeile für Zeile vom externen Speicher über das parallel Port Interface PPI0 in den Cache übertragen. Aufgrund der unterschiedlichen Auflösung in Zeilen- bzw. Spaltenrichtung wird nur jede 2 Zeile des Grauwertbildes übertragen (vertikales Subsampling), so dass die maximale Größe des Fusionsbereiches 752 x 110 Pixel beträgt. Dieser Bereich wird vom Fusionsalgorithmus bearbeitet. Das Fusionsbild wird dann über den PPI1 Port wieder in den externen Speicher transformiert. Zur schritthaltenden Verarbeitung ist der Bildspeicher als Doppelspeicher implementiert: während der Übertragung der Rohdaten in den ersten Speicherbereich erfolgt die Fusion im zweiten Speicherbereich und umgekehrt (Abbildung 34).

Abbildung 35 veranschaulicht die Datenverarbeitung im Blackfin.

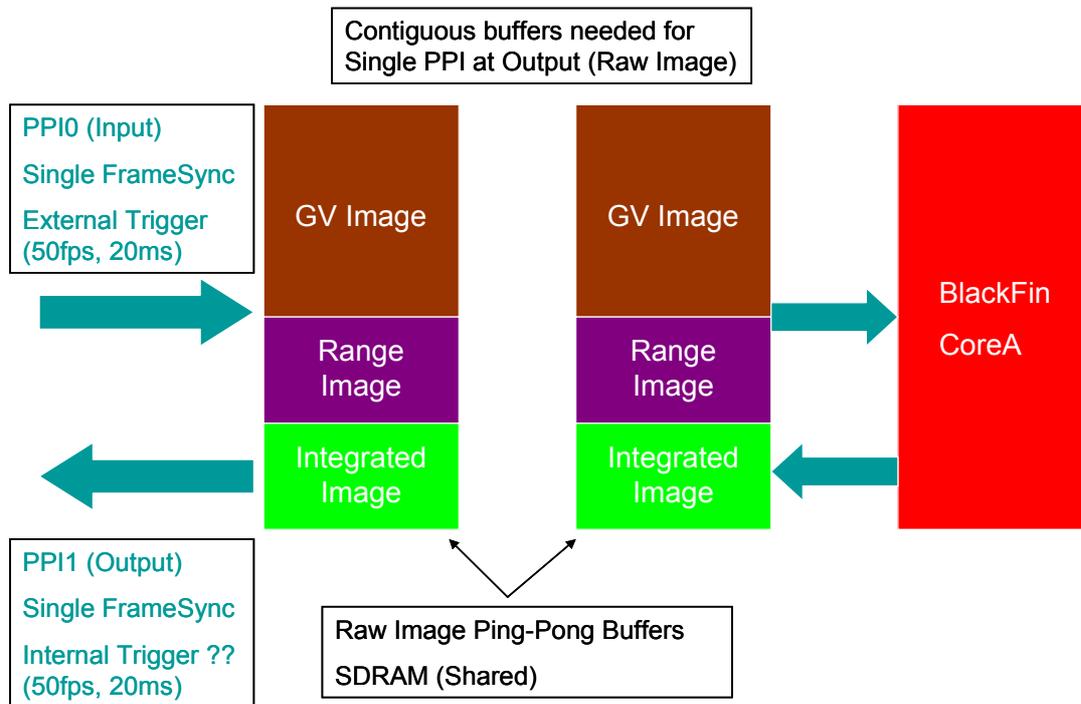


Abbildung 34: Prinzip des Doppelbuffers

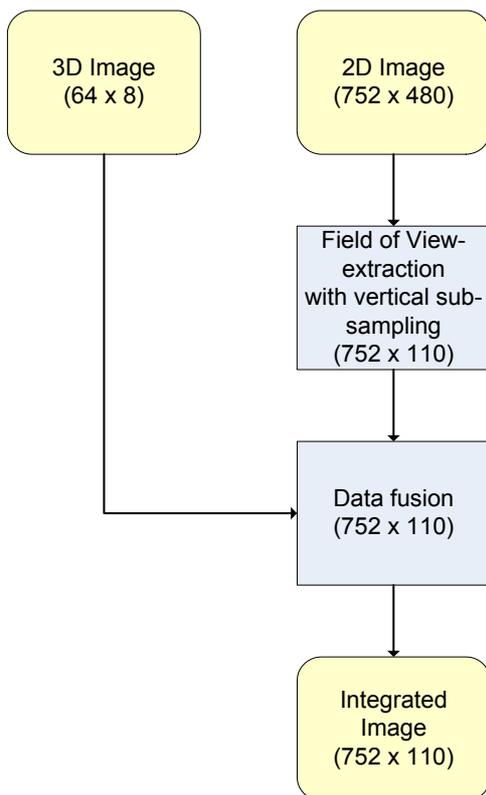


Abbildung 35: Datenfluss

Nachfolgende Softwaremodule wurden auf dem Blackfin System implementiert und erfolgreich verifiziert:

1. Algorithmus zu Datenfusion in Echtzeit im CoreA des Blackfin Prozessors, Verarbeitungszeit 15.55 ms
2. Implementierung der Kommandoschnittstelle zum Anwenderprogramm über den seriellen CameraLink Port im CoreB des Prozessors
3. Prüfsummenberechnung im Kommandointerface
4. Fehlerbehandlung im Kommandointerface (Übertragungs- und Syntaxfehler)
5. Synchronisation der beiden Blackfin-Cores

6. Flash Programm zum Ändern der Fusionsparameter zur Laufzeit
7. Control Interface zur Übernahme von Parameteränderungen
8. Bootprogramm zum Start des Blackfin Programms beim Einschalten / Reset

Eine detaillierte Beschreibung der Fusionsalgorithmen findet sich in den Berichten des Projektpartners Forwiss sowie den Veröffentlichungen.

4.6.4 AP5.4: Test und Evaluierung

Zur Inbetriebnahme, Parametrierung und Test des Systems, sowie zur Visualisierung der Bilddaten wurde eine Windows Anwendung mit graphischer Benutzeroberfläche implementiert (Abbildung 36).

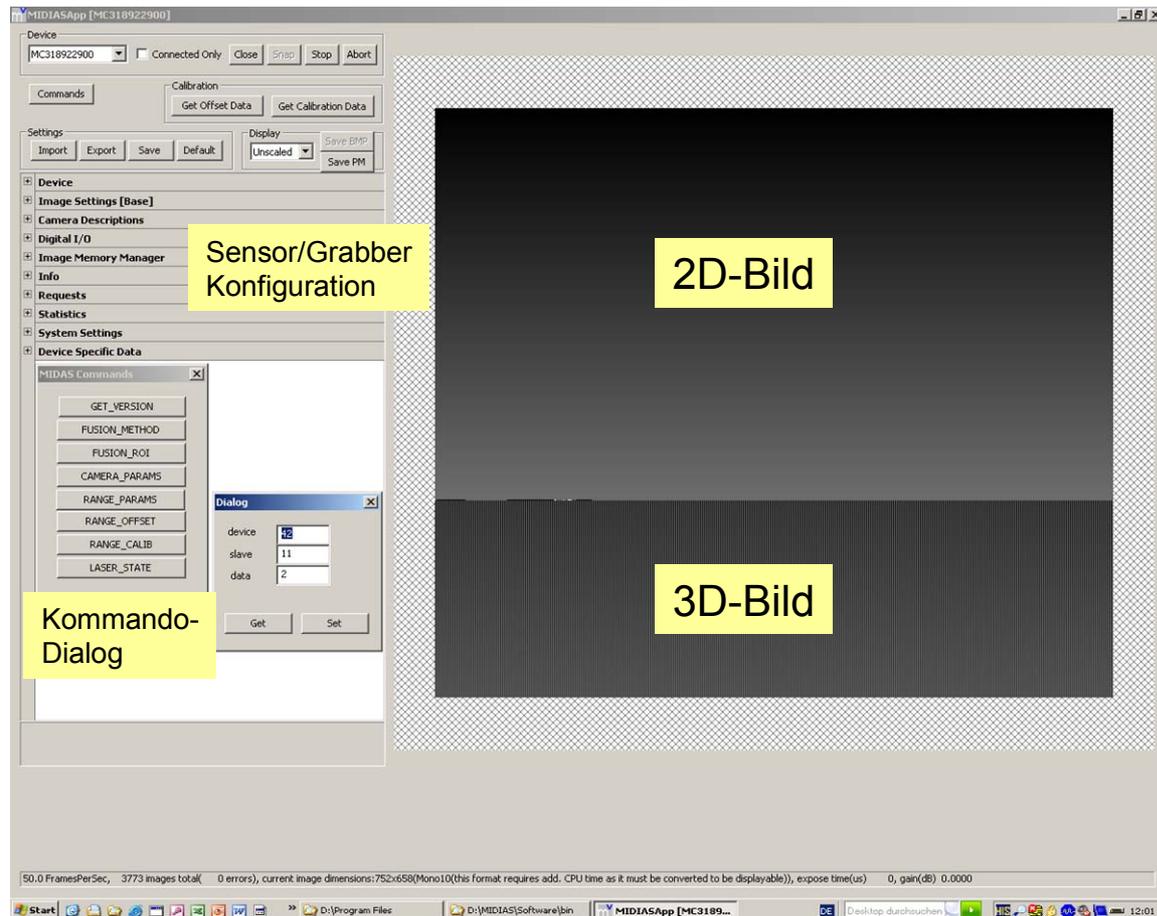


Abbildung 36: Graphische Benutzeroberfläche der MIDIAS Applikation

Die Applikation bietet folgende Funktionalität:

- Konfiguration der Bildspeicherkarte (Bildformat, Pixelformat, etc.)
- Bilderfassung vom Kamerakopf
 - Single Grab
 - Continuous Grab
- Anzeige der Kamerabilder in Echtzeit
 - Rohdaten 2D und 3D
 - Fusionsbild
- Speichern von Bildern
- Implementierung des MIDIAS Kommandointerfaces
- Funktionen zur Unterstützung der Kamerakalibrierung

Über das MIDIAS Kommandointerface erfolgt die Parametrierung aller Systemparameter. Dies umfasst sowohl low-level Parameter wie das Setzen und Lesen aller Kameraparameter aber auch umfassende Funktionen zum Ändern von Kalibrierungsparametern. Nachfolgende Tabelle zeigt die vorhandenen Kommandos:

Code	Alias	Description
1	GET_DEVICE_VERSION	Requests the integrated camera version
2	SET_TIME_STAMP	Sets the time stamp (synchronization)
3	GET_TIME_STAMP	Requests the time stamp of the fusion box (Blackfin)
4	SYNCHRONIZE_COMPONENTS	Synchronizes the hardware components
5	SET_DEBUG_MODE	Sets the debug mode
6	GET_DEBUG_MODE	Gets the debug mode
7	UPLOAD_FIRMWARE	Overwrites the fusion-board firmware
8	SET_FUSION_METHOD	Sets the fusion method
9	GET_FUSION_METHOD	Requests the fusion method
10	SET_FUSION_ROI	Sets the region of interest for the fusion algorithm
11	GET_FUSION_ROI	Requests the region of interest for the fusion algorithm
12	SET_FILTER_TYPE	Sets the filter type and resets the filter
13	GET_FILTER_TYPE	Requests the filter type
14	SET_FILTER_PARAM	Sets the filter parameters without resetting
15	GET_FILTER_PARAM	Requests the filter parameters
16	RESET_FILTER	Requests a filter reset
17	SET_CAMERA_PARAMETER	Set camera parameter
18	GET_CAMERA_PARAMETER	Get camera parameter
19	SET_NEXT_CAMERA_PARAMETER	Set next camera parameter
20	GET_NEXT_CAMERA_PARAMETER	Get next camera parameter
21	SET_ALL_GV_PARAM	Sets all parameters of the grayvalue camera
22	GET_ALL_GV_PARAM	Requests all parameters of the grayvalue camera
23	SET_ALL_RNG_PARAM	Sets a parameter of the range camera
24	GET_ALL_RNG_PARAM	Requests all parameters of the range camera
25	SET_RNG_OFFSET	Set the offset of the range camera
26	GET_RNG_OFFSET	Requests the offset of the range camera
27	SET_RNG_CALIB	Set the calibration data of the range camera
28	GET_RNG_CALIB	Requests the calibration data of the range camera
29	SET_FUSION_CALIB	Set the calibration data of the fusion box
30	GET_FUSION_CALIB	Requests the calibration data of the fusion box
31	SET_ACQUISITION_MODE	Sets the mode for image acquisition
32	GET_ACQUISITION_MODE	Requests the image acquisition mode
33	SET_LASER_STATE	Sets the state of the laser
34	GET_LASER_STATE	Requests the state of the laser

Tabelle 3: MIDIAS Kommando- Interface

Zur Unterstützung der 3D Kamerakalibrierung wurden folgende Funktionen implementiert:

- Offsetmessung des 3D-CMOS Sensors
Zur Korrektur des Fixed Pattern Noise des 3D-CMOS Sensors werden die Signale des 3D-CMOS Sensors in Abhängigkeit von der Shutterlänge und Anzahl der akkumulierten Laserpulse gemessen und in einer Tabelle im Flash des Sensorkopfes abgelegt. Die Funktion führt die erforderliche Sensorkonfiguration automatisch durch und speichert die Offsetdaten.
- Aufzeichnung und Speichern von Kalibriersequenzen zur Abstandskalibrierung
Die im MDSI- Algorithmus benötigten Parameter müssen in einem Kalibrierprozess ermittelt werden und werden im Flashspeicher des Kamerakopfes abgelegt. Die Funktion generiert die erforderlichen Bildsequenzen zur Abstandskalibrierung.

Ablauf der Abstandskalibrierung

1. Der Sensor wird in einem definierten Abstand vor einer Ebene platziert
2. Rohdaten des Sensors werden mit unterschiedlicher Anzahl akkumulierter Laserpulse und unterschiedlicher Verzögerung des Laserpulses erfasst. Durch unterschiedliche Verzögerungszeiten des Lasers wird eine Abstandsänderung des Targets simuliert, so dass der gesamte Messbereich mit nur einem festen Objektstand durchlaufen wird.

3. Aus den gespeicherten Bildsequenzen werden offline die MDSI- Parameter berechnet. Die MDSI- Parameter werden im Flashspeicher des Kamerakopfes abgelegt.

Als Benchmark der Fusionsalgorithmen wurden sowohl simulierte Bilder als auch gespeichertem Szenenbilder verwendet. Durch direkten Vergleich der Ergebnisbilder wurde sichergestellt, dass die Ergebnisse der Blackfin Verarbeitung mit den auf dem PC entwickelten und intensiv getesteten Verfahren identisch sind.

Nach Optimierung der Blackfin-Verarbeitung konnte die Verarbeitungszeit für ein 752x220 Pixel großes Eingangsbild auf 15.55 ms reduziert werden. Die geforderte Echtzeitfähigkeit ist somit gegeben.

Da aufgrund der Terminverzögerungen bei der Chip- und Hardwareentwicklung der voll funktionsfähige Kamerakopf erst nach offiziellem Projektende zur Verfügung stand, konnten der Einbau und die Evaluierung des Gesamtsystems im Versuchsfahrzeug nicht mehr im Berichtszeitraum durchgeführt werden und werden voraussichtlich im Projektnachlauf erfolgen.

5 Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit der Ergebnisse

Ziel des Projektes ist es, mikrosystemtechnisch integrierte 2D/3D-Kamerasysteme als Prototypen umzusetzen und damit die Funktionalität und den Nutzen der zugrunde liegenden Abbildungsprinzipien 2D HDR CMOS Kamera und Puls-Laufzeit-basierter 3D-CMOS Kamera sowie der entwickelten Fusionsalgorithmen zu demonstrieren.

Neben den im Fokus stehenden Applikationen für Fahrerassistenzsysteme stehen vielfältige weitere Einsatzgebiete mit dem beschriebenen Sensorprinzip offen, da der Einsatz von Kameras für viele Anwendungen – auch im Nicht-Automotiv-Bereich – wie z.B. für Überwachungs- und Sicherungsaufgaben kosten- und leistungsoptimierte Sensorsysteme erfordert.

Weiterhin zeichnet sich in der 3D-Technologielandschaft deutlich ab, dass die 2D/3D Bilddatenfusion zunehmend an Bedeutung gewinnen wird, da die Erhöhung der Pixelanzahl für reine 3D-Kameras in den Megapixelbereich an physikalische Grenzen stoßen wird. Dies ist insbesondere für alle Applikationen bei hohen Geschwindigkeitsanforderungen wie im Automobil- oder Verkehrssektor wichtig. Damit erhöht die in MIDIAS entwickelte Fusions- Algorithmik die Vermarktungschancen der Time-of-Flight-Technologie.

Aufgrund der bereichsübergreifenden Einsatzmöglichkeiten integrierter 2D/3D Kameras hat die Siemens AG die Absicht, die im Projekt entstehende Technologie zu vermarkten. Dieser Entschluss wird durch ein im Jahre 2008 begonnenes STA-Projekt untermauert, welches zum Ziel hat, die Kommerzialisierung der 3D-CMOS Technik voranzutreiben. Eine Firmengründung ist vorgesehen.

Die Siemens Technology Accelerator GmbH (STA) konzentriert sich auf das Kommerzialisieren bei Siemens entstandener Technologien, die keine adäquate geschäftliche Umsetzung erfahren. Dies erfolgt im Wesentlichen mittels Spin-off, Verkauf oder Lizenzierung. Übergeordnetes Ziel des STA ist das Ausschöpfen von Werten, die in Technologien verborgen liegen und anderweitig nicht genutzt werden. Der STA begleitet den Prozess des Technologietransfers von der Businessplan-Erstellung über das Gewinnen von Partnern und Pilotkunden bis zur Verhandlung mit Investoren oder Käufern. Wird ein Start-up gegründet, kann Siemens von diesem Unternehmen als Gesellschafter, Partner und häufig als Kunde profitieren. Zudem entstehen Arbeitsplätze im High-Tech-Sektor.

6 Bibliographie, Veröffentlichungen

Im Arbeitspaket Sensorfusion wurden folgende Veröffentlichungen durchgeführt:

- [1] T. Hanning, A. Lasaruk, and T. Tatschke: Calibration and Low-Level Data Fusion Algorithms for a Parallel 2D/3D-Camera. In: Information Fusion (accepted) . 2009.
- [2] T. Hanning, A. Lasaruk: MIDIAS: An Integrated 2D/3D Sensor System for Safety Applications. In: Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems (ACIVIS), Juan-les-Pins, France . 2008.
- [3] T. Hanning, A. Lasaruk: Calibration of a System of a Gray-Value Camera and an MDSI Range Camera. In: Performance Metrics for Intelligent Systems (PerMIS'08) Workshop, NIST, Gaithersburg, USA . 2008.
- [4] T. Hanning, A. Lasaruk, R. Wertheimer: MDSI Range Camera Calibration. In: 12th International Forum on Advanced Microsystems for Automotive Applications (AMAA) Berlin 49-61. 2008.

- [5] MIDIAS Konsortium: Projektpräsentation auf dem Clustertreffen Fahrerassistenzsysteme
03.12.2007, München
- [6] MIDIAS Konsortium: Projektpräsentation auf dem Clustertreffen Fahrerassistenzsysteme
04.05.2009, Berlin
- [7] MIDIAS Konsortium: „Technical Report: MIDIAS Hardware and Software Specifications“
Internes Entwicklungsdokument des Konsortiums, 2010