

## 2D/3D Sensorsimulation (PMD-Sim)



Prof. Dr.-Ing. habil.  
Otmar Loffeld

Zentrum für Sensorsysteme (ZESS)

Universität Siegen  
Paul-Bonatz-Str. 9-11  
57068 Siegen



Prof. Dr.-Ing.  
Andreas Kolb

Zentrum für Sensorsysteme (ZESS)

und  
Lehrstuhl für  
Computergraphik und  
Multimediasysteme

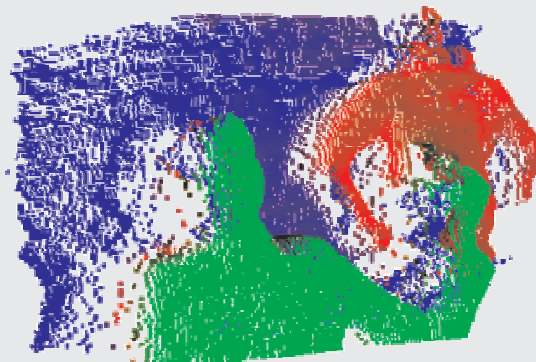
Universität Siegen  
Hölderlinstr. 3  
57068 Siegen

## Antragspaket *Dynamisches 3D Sehen*

Prof. Dr.-Ing.  
Andreas Kolb

Zentrum für  
Sensorsysteme  
(ZESS)

Universität Siegen  
Hölderlinstr. 3  
57068 Siegen



Prof. Dr.-Ing. habil.  
Otmar Loffeld

Zentrum für  
Sensorsysteme  
(ZESS)

Universität Siegen  
Paul-Bonatz-Str. 9-11  
57068 Siegen

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>ALLGEMEINE ANGABEN</b>	<b>1</b>
1.1	Antragsteller	1
1.2	Thema	1
1.3	Kennwort	1
1.4	Fachgebiet und Ausrichtung	1
1.5	Gesamtdauer	2
1.6	Antragszeitraum	2
1.7	Gewünschter Beginn der Förderung	2
1.8	Zusammenfassung	2
<b>2</b>	<b>STAND DER FORSCHUNG, EIGENE VORARBEITEN</b>	<b>3</b>
2.1	Stand der Forschung und eigene Vorarbeiten zur PMD-Technologie	3
2.2	Stand der Forschung und eigene Vorarbeiten zum Thema 2D/3D-Bildsensorik und -Verarbeitung	4
2.3	Literatur zum Stand der Forschung und eigenen Vorarbeiten	10
<b>3</b>	<b>ZIELE UND ARBEITSPROGRAMM</b>	<b>14</b>
3.1	Systemtheoretische Betrachtung, Modellierung und Simulation eines CMOS/CCD-Sensors	14
3.2	Entwicklung und Implementierung eines softwarebasierten CMOS/CCD-Simulators / PMD-Simulators	14
3.3	Reale Verzerrungs- und Störeffekte	15
3.4	Entwicklung und Implementierung eines Objekteditors	16
3.5	Entwicklung und technische Umsetzung einer Objektbibliothek	16
3.6	Entwicklung einer grafischen Benutzeroberfläche	17
3.7	Optimierung der Algorithmen hinsichtlich der Rechenzeit	18
3.8	Arbeitsplan	18
3.9	Untersuchungen an Menschen	19
3.10	Tierversuche	19
3.11	Gentechnologische Experimente	19

---

<b>4</b>	<b>BEANTRAGTE MITTEL</b>	<b>19</b>
4.1	Personalbedarf	19
4.2	Wissenschaftliche Geräte	20
4.3	Verbrauchsmaterial	22
4.4	Reisen	22
4.5	Publikationskosten	22
4.6	Sonstige Kosten	22
<b>5</b>	<b>VORAUSSETZUNGEN FÜR DIE DURCHFÜHRUNG DES VORHABENS</b>	<b>23</b>
5.1	Zusammensetzung der Arbeitsgruppe	23
5.2	Zusammenarbeit mit anderen Wissenschaftlern	24
5.3	Arbeiten im Ausland und Kooperationen mit ausländischen Partnern	24
5.4	Apparative Ausstattung	24
5.5	Laufende Mittel für Sachausgaben	24
<b>6</b>	<b>ERKLÄRUNGEN</b>	<b>24</b>
<b>7</b>	<b>UNTERSCHRIFTEN</b>	<b>25</b>
<b>8</b>	<b>VERZEICHNIS DER ANLAGEN</b>	<b>25</b>

## Allgemeine Angaben

Antrag auf Gewährung einer Sachbeihilfe  
Neuantrag

### 1.1 Antragsteller

<p><b>Otmar Loffeld, Dr.-Ing. habil.</b> Universitätsprofessor, Projektbereichsleiter Zentrum für Sensorsysteme (ZESS), Projektbereich 2, und Institut für Nachrichtenverarbeitung <a href="mailto:Loffeld@zess.uni-siegen.de">Loffeld@zess.uni-siegen.de</a> <a href="http://www.zess.uni-siegen.de">www.zess.uni-siegen.de</a> <a href="http://www.nv.et-inf.uni-siegen.de/pb2/">www.nv.et-inf.uni-siegen.de/pb2/</a> Tel.: 0271 / 740 3125 Privat: Nassauer Straße 21 57234 Wilnsdorf  Tel.: 02737 2299936 0179 202 999 6</p>	<p><b>Andreas Kolb, Dr.-Ing.</b> Universitätsprofessor Zentrum für Sensorsysteme und Lehrstuhl für Computergraphik und Multimediasysteme <a href="mailto:kolb@informatik.uni-siegen.de">kolb@informatik.uni-siegen.de</a> <a href="http://www.zess.uni-siegen.de">www.zess.uni-siegen.de</a> <a href="http://www.cg.informatik.uni-siegen.de/">www.cg.informatik.uni-siegen.de/</a> Tel. 0271 / 740 2404</p>
<p>Universität Siegen Paul-Bonatz-Str. 9-11 57068 Siegen Tel. : 0271-740-3400 Fax: 0271-740-33 96</p>	

### 1.2 Thema

**2D/3D-Sensorsimulation**

### 1.3 Kennwort

PMD-Sim

### 1.4 Fachgebiet und Ausrichtung

Elektrotechnik/Informatik, System- und Signaltheorie, Modellbildung und Simulation:  
Systemsoftware, Multidimensionale Sensorik, Visualisierung

**Arbeitsgebiete der Antragsteller und ihrer Arbeitsgruppen:**

**Prof. Loffeld:** Optimale Signalverarbeitung, Multi-Sensordatenfusion- Remote Sensing, Synthetic Aperture Radar (SAR), Modellbildung und SAR-Simulation

**Prof. Kolb:** Computergraphik, Bildverarbeitung, Geometrische Modellierung, Modelloptimierung, Visualisierung, Virtual Environments

**1.5 Gesamtdauer**

4 Jahre

**1.6 Antragszeitraum**

24 Monate

**1.7 Gewünschter Beginn der Förderung**

01.01.2006

**1.8 Zusammenfassung**

Eines der zentralen Probleme der Automatisierungs-, Kontroll- und Sicherheitstechnik stellt die schnelle und präzise Erfassung von bewegten dreidimensionalen Objekten und ihrer räumlichen Orientierung dar. Herkömmliche optische Bildsensoren, die lediglich 2D-Aufnahmen mit Farb-Informationen liefern, stoßen hierbei schnell an ihre Grenzen.

PMD-Sensoren liefern vektorielle dreidimensionale Messwerte eines 3D-Raums und ermöglichen somit direkt die 3D-Darstellung und Lokalisierung von Objekten. PMD-Sensoren sind selbstbeleuchtend im Infrarotbereich und können daher auch bei schlechteren Sichtverhältnissen (Nebel, Regen, Dunkelheit) im Gegensatz zu optischen Systemen weitgehend zuverlässig arbeiten. Dank dieser Eigenschaften bieten PMD-Bildsensoren einen wesentlichen Vorteil gegenüber 2D-Bildsensoren. Die Kombination eines PMD-Sensors mit einem lateral hochauflösenden CMOS-Sensor bietet den Vorteil der Kombination von hochaufgelösten Helligkeitsbildern mit 3D-Helligkeits- und Entfernungsbildern des PMD-Sensors.

Das Ziel dieses Projektes besteht darin, einen Simulator für eine 2D/3D-Kamera, basierend auf einer Kombination eines 3D-PMD-Sensors und eines hochauflösenden 2D-CMOS-Sensors zu entwickeln. Der Simulator soll dabei unterschiedliche Sensorgeometrien und konstruktive Designs berücksichtigen können, flexibel parametrierbar sein, alle physikalischen Effekte und auftretenden Störphänomene realitätsgetreu darstellen, sowie Test- und Referenzdaten für die nachfolgende Verarbeitung liefern können. Die mechanischen, optischen und alle anwendungsrelevanten Eigenschaften der verwendeten Sensoren müssen dazu im Simulator systemtheoretisch präzise beschrieben und realisiert werden.

Computergestützte 3D-Sensor-Simulation bietet nicht nur eine kostengünstige Alternative zur realen Aufnahmen, sondern erweisen sich als sehr hilfreich bei der Dimensionierung und Parametrierung von 3D-Sensoren. Ein solcher Simulator stellt damit eine leistungsfähige Umgebung dar, mit der für alle Anwender, Algorithmenentwickler und Systemplaner, innerhalb und außerhalb des gesamten Antragspaketes, unabhängig vom Entwicklungsstand und -fortschritt der PMD-Sensorhardware realitätsnahe Testdaten zur Verfügung gestellt werden können. Mit diesen Testdaten können Algorithmen

schnell auf ihre Funktionstüchtigkeit untersucht, Systemkonfigurationen auf ihre Eignung für eine spezielle Anwendung überprüft und Anwendern der PMD-Technologie vor dem realen Einsatz bereits ein Bild von der Leistungsfähigkeit, bzw. den Leistungsgrenzen einer bestimmten PMD-Konfiguration vermittelt werden.

## **2 Stand der Forschung, eigene Vorarbeiten**

Die Entwicklung und Herstellung verschiedener Typen pixelbasierter, bildgebender 2D-Bildsensoren nach vorgegebenen Spezifikationen gehört heute in vielen Anwendungsgebieten zum Stand der Technik. Abhängig von der konkreten Anwendung können Arrays mit vorgegebener Bildauflösung, Empfindlichkeit und Dynamik hergestellt werden. Konventionelle Bildsensoren erzeugen über die einfallende Lichtintensität ein 2D-Bild der Umgebung.

Die schnelle, berührungslose und präzise 3D-Bilderfassung ermöglicht über die 2D-Umfeldwahrnehmung hinaus neue technische Lösungen sowie die Verbesserung von bestehenden Produkten in vielen Industriezweigen, beispielsweise in der Automobilindustrie, wo mit einer 3D-Sensorik neuartige Fahrerassistenzsysteme entwickelt werden können, um der Vision des unfallfreien Fahrens ein wesentliches Stück näher zu kommen. Besondere Fortschritte in der technischen Leistungsfähigkeit von Anlagen und Produkten können auch in der Automatisierungs- und Sicherheitstechnik und in der Robotik erzielt werden, da hier die räumliche Orientierung von entscheidender Bedeutung ist.

Im Zentrum für Sensorsysteme (ZESS) und im Institut für Nachrichtenverarbeitung (INV, Prof. Schwarte) ist in den letzten Jahren einer neuer Typ eines optoelektronischen Halbleiterchips entstanden, der in der Lage ist, das von einer aktiven Beleuchtungsquelle ausgesendete modulierte und von einem Objekt reflektierte Lichtsignal parallel aufzunehmen und noch direkt in der Halbleiterstruktur eine räumliche Information zu gewinnen. So kann mit diesen optoelektronischen Sensoren eine 3D-Information in Echtzeit ermittelt werden. Das Verfahren wird als sogenannte Photonen-Mischung bezeichnet, die dazugehörigen Sensoren als PMD - Photonic-Mixer-Device (Photo-Misch-Detektor).

Von besonderer Bedeutung ist die deutliche Verringerung des technischen Aufwands und der damit verbundenen Kosten. Zusätzlich kann das Bauvolumen mittels PMD-Array gegenüber konventionellen Systemen (mechanischer Aufbau mit Scanner) um etwa 1:1.000.000 reduziert werden. Die Integration von PMD-Detektoren in kompakte Gehäusebauformen wurde für eine 3D-Kamera mit 64x16 und 120x160 Empfangspixeln bereits erfolgreich demonstriert. Die Fertigung dieser Sensoren ist zudem einfach und basiert auf standardisierten CMOS Halbleiter-Fertigungsprozessen.

Damit wird grundsätzlich auch die Herstellung hybrider Pixelarrays möglich, bei denen Sensoren unterschiedlicher Funktionsprinzipien gemischt werden. Neuere Untersuchungen zeigen sogar, dass das Fernziel einer mobil einsetzbaren dreidimensionalen Bildsensorik am ehesten durch die Kombination verschiedener Sensoren erreicht werden kann. Dabei liefern Standardsensoren ein hochauflösendes zweidimensionales Bild, das durch punktuelle Tiefeninformation ergänzt wird. Diese Tiefeninformation kann alternativ auch durch Radarsensoren bereitgestellt werden, deren Daten mit den Bilddaten zu fusionieren sind.

### **2.1 Stand der Forschung und eigene Vorarbeiten zur PMD-Technologie**

Der Stand der Forschung auf dem Gebiet der PMD-Technologie ist sehr stark von den Arbeiten und Veröffentlichungen aus dem Institut für Nachrichtenverarbeitung (INV) und

dem Zentrum für Sensorsysteme (ZESS) der Universität Siegen geprägt. Aus diesem Grunde kann hier nicht zwischen dem allgemeinen Stand der Technik und den eigenen Vorarbeiten der Antragsteller unterschieden werden. Auf Basis von Eigenmitteln und von Kooperationen mit der DFG (1997-2001), dem BMBF (2001-2004), der Industrie und mit den Spin-off-Firmen S-TEC (ab 1997) und PMD Technologies GmbH (ab 2002) konnte in Siegen die grundsätzliche Eignung der PMD-Technologie als Schlüsseltechnologie für das schnelle 3D-Sehen verifiziert werden. Der eigentliche Durchbruch erfolgte erst im Herbst 2003 mit einem hochempfindlichen und rauscharmen Layout für 64×16- und in 2004 für 120×160-PMD-Pixel 3D-Sensoren.

Folgende von der DFG geförderte Vorhaben haben maßgeblich zur Entwicklung der PMD-Technologie beigetragen:

Integrierte 2D/3D-Geometrieprüfung und Szenenanalyse	DFG, Lo455/4-1, 1995-1996 Schwerpunktprogramm: Automatische Sichtprüfung technischer Objekte
Integrierte 2D/3D-Geometrieprüfung und Szenenanalyse	DFG, Lo455/4-2/3, 1996-1998 Schwerpunktprogramm: Automatische Sichtprüfung technischer Objekte
Integrierte 2D/3D-Geometrieprüfung und Szenenanalyse	DFG, Schw455/4-2/3, 1998-2000 Schwerpunktprogramm: Automatische Sichtprüfung technischer Objekte

Das Grundprinzip und Funktionsweise von PMD-Sensoren kann hier somit als bekannt vorausgesetzt werden.

## **2.2 Stand der Forschung und eigene Vorarbeiten zum Thema 2D/3D-Bildsensorik und -Verarbeitung**

### **Stand der Forschung allgemein**

Bisherige Ansätze hybrider Sensoren sind empirischer Art. Basierend auf einer gegebenen Problemstellung wurde in der Regel ein 2D-bildgebendes Sensorelement verwendet, welches punktuell, zeilen-, scanlinienorientiert oder in seltenen Fällen bildorientiert mit Entfernungsinformation ergänzt wurde. Verwendet wurden hierzu in der Regel Scannereinrichtungen, mit deren Hilfe ein punktförmig abtastender Entfernungssensor (Laser Distance Range Finder) zu einem Zeilen- oder Flächensensor erweitert wurde. Die Kalibrierung derartiger hybrider Systeme ist nicht trivial, aber weitgehend gelöst (u.a. auch durch Vorarbeiten der Antragsteller). Wahlweise wird der verwendete 2D-Sensor mit Hilfe von Lichtschnittverfahren oder projizierten Mustern (projected fringe techniques) zu einem 3D-Sensor erweitert. Die nachfolgend aufgeführten Literaturstellen vermitteln einen Überblick zum Stand der Technik auf diesem Gebiet. Referenzen zu „Shape from Shading“- Ansätzen wurden hierbei nicht berücksichtigt.

### **Eigene Vorarbeiten**

#### **Laserabstandsmesstechnik**

Hier zu nennen ist die System- und Anwendungsentwicklung hinsichtlich der Puls- und der Phasenlaufzeitmessung sowie der Triangulationsmesstechnik ([1] - [9]). Die Erkenntnisse und Verfahren der Abstandsmesstechnik wurden z. T. auch bei der 3D-Bildverarbeitung verwendet.

### Stereo-Bildverarbeitung und Triangulation

In Zusammenarbeit mit der Firma Bosch wurden ausführliche Untersuchungen hinsichtlich der Teileerkennung/Vollständigkeitsprüfung von Vergaserteilen durchgeführt ([135]). Weitere Vorarbeiten von Seiten der Antragsteller auf dem Gebieten der Triangulation und Farbtriangulation sind in z.B. in [127] - [130] veröffentlicht.

### Bildfolgenanalyse

Für die Problematik der Objektvermessung bei der Fertigung von nahtlos gewalzten Rohren während des Walzprozesses wurde ein System auf Basis der 2D/3D-Echtzeitbildverarbeitung entwickelt. Aus der Bildfolgenanalyse wurden Bewegungs- und Geometriedaten in Videoechtzeit ermittelt ([143], [144]).

### Strukturierte Beleuchtung

Hier wurde ein Verfahren der strukturierten Beleuchtung entwickelt, mit dem es möglich ist, aus einem 2D-Bild eine eindeutige 3D-Information bei gleichzeitig hoher Messauflösung zu gewinnen. Dies wird erreicht durch den farbcodierten Lichtansatz, der Verwendung des Phasen-Shift-Verfahrens in den einzelnen R-, G-, B-Bildern sowie der Eindeutigkeit bei mehreren Perioden durch eine linear ansteigende Farbsättigung. Man erhält die 3D-Information somit in Video-Bildraten. Ein Problem ist hierbei das unterschiedliche Rückstreuverhalten der Objekte in den verschiedenen Spektralbereichen ([121], [138] - [141]).

### 3D-Lasermesstechnik

Mit einem im ZESS entwickelten Multisensorkonzept bietet sich eine Möglichkeit, 3D-Objekte flexibel auf eine Entfernung bis ca. 10 m zu vermessen. Hierbei wird ein Laser-radar-Entfernungsmesssystem verwendet, das mit Hilfe eines 2D-Spiegelscanners zu einem 3D-Messsystem erweitert wird ([142]). Als zweite Komponente des Multisensor-



Abbildung 2-1: Grauwertbild einer CCD Kamera



Abbildung 2-2: Entfernungsbild aus Scannerdaten

systems kam eine CCD-Kamera mit nachgeschaltetem Bildverarbeitungssystem zum Einsatz, mit der die zu vermessende Szene visuell erfasst und analysiert wird. Durch die visuelle Information kann der 3D-Messvorgang optimiert werden, so dass nur noch relevante Bildbereiche vermessen werden müssen. Die neben stehenden Abbildungen zeigen Ergebnisse dieses Ansatzes.

Neben der Erzeugung von 3D-Bildern mit Hilfe der Laserabstandsmessung, eines

2D-Scanners und der Objektvermessung insbesondere bei großen Abständen (1m-15m) wurde die Problematik der Fusionierung von 2D-Intensitätsbildern mit den Daten des 3D-Laserscannersystems bearbeitet ([131], [132]). Mit der Fusionierung konnte eine adaptive Laserstrahlführung realisiert werden, um nur die relevanten Teile des „field of view“ abzutasten (BMFT Verbundprojekt „3D-Objektvermessung auf größere Entfernungen“, Fördkz. 13N5882 und DFG Schwerpunktprogramm Automatische Sichtprü-



fung technischer Objekte, Thema: Integrierte 2D/3D-Geometrieprüfung und Szenenanalyse, Lo455/4-1, 1995-1996, Lo455/4-2/3/4, 1996-1998, SCHW 630/12000).

### **PMD-Sensorik und PMD-Signalverarbeitung**

Die PMD-Technologie für die berührungslose 3D-Erfassung unbekannter Szenarien stellt ein gewisses Alleinstellungsmerkmal der Siegener Antragstellergruppe dar. Die Technologie wurde an der Universität Siegen, bzw. im ZESS erfunden (Prof. Dr. R. Schwarte), die Systemtechnik zur Ansteuerung des bildgebenden Chips und die Verarbeitungsalgorithmik im ZESS entwickelt und in ein erfolgreiches Spin-Off-Unternehmen (PMDTechnologies) transferiert, zu dem intensive Kooperationskontakte bestehen (u.a. [17] - [58]).

### **Weitere direkt bildgebende 3D-Erfassungssysteme**

Hierzu sind die etwa gleichzeitig veröffentlichten Ansätze des CSEM<sup>1</sup>, [12], [48], [49] zu zählen. Auch die von der Firma Canesta (<http://www.canesta.com/>) in den Vereinigten Staaten patentierten Ansätze und Produkte sind hier zu nennen. Die Unterschiede zwischen den Ansätzen sind den Verfassern bekannt, es soll hier auch keine Leistungsfähigkeitsbewertung vorgenommen werden, zumal diese für eine systemtheoretische Simulation irrelevant sind, bei der ein Simulator die wesentlichen Effekte eines Sensor's system-/bzw. signaltheoretisch darstellt.

### **Eigene Vorarbeiten zur PMD-Simulation**

Im Auftrag eines großen deutschen Automobilherstellers (Volkswagen AG) hat das ZESS einen Simulatoransatz zum Einsatz des PMD in einer Bewegobjektsituation im Hinblick auf ein Fahrerassistenzsystem entwickelt. Für den Zeitraum dieser Studie, die Mitte des Jahres 2004 abgeschlossen wurde, wurde ein Nondisclosure-Agreement (NDA) unterzeichnet, welches sich auf Details der Anwendung, der simulierten Geometrien und des Auftraggebers, jedoch nicht auf Verfahrensweisen und wissenschaftliche Ergebnisse erstreckt. Aufgrund des NDA gibt es keine einschlägigen Veröffentlichungen der Antragsteller zu diesen Vorarbeiten, es können lediglich einige Referenzen zum mit der Problemstellung verwandten Thema der SAR-Simulation auf Seiten der Antragsteller angeführt werden (z.B. [103] - [114]), welche einschlägige Expertise auf diesem Gebiet belegen. Aufgrund des Fehlens direkter einschlägiger Referenzen werden die Vorarbeiten zu diesem Thema detaillierter als sonst üblich ausgeführt:

Im Rahmen dieses Projektes wurde ein Verfahren entwickelt, welches aus einer in absolut referenzierten 3D-Szene, repräsentiert als eine Ansammlung von 3D-Punkten ein in relativen Sensorkoordinaten beschriebenes 3D-Bild generiert, welches ein PMD-Sensor, installiert auf einer innerhalb dieser Szene bewegten Plattform, von dieser Szene liefern würde. Systemtheoretisches Ziel war damit die Ermittlung und simulative Darstellung der PMD-Systemantwort auf eine 3D-Anregung. Es wurde besonderen Wert darauf gelegt, die Realisierung der Algorithmen weitgehend unabhängig von der Parametrisierung des Sensors (Auflösung, Pixelgröße, Optikeigenschaften usw.) umzusetzen.

Als Eingangsdaten für den Simulator dienten von der Firma Volkswagen zur Verfügung gestellte Datensätze eines aufgenommenen Crashes. Zu Testzwecken und für Leistungsfähigkeitsanalysen des Simulators wurden außerdem weitere Datensätze gene-

---

<sup>1</sup> Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique SA

riert. Es ist weiterhin möglich, die einzelnen Datensätze zu kombinieren und gemeinsam zu nutzen (z.B. mehrere Objekte im Sichtfeld des Sensors).

Es wurde ein Programm entwickelt, welches sowohl die 3D-Datensätze von Objekten einlesen oder als auch Objekte generieren kann. Anhand der realen Randbedingungen kann dann ein virtueller PMD-Sensor parametrierbar werden, der in einem weiteren Schritt aus den gegebenen 3D-Daten PMD-Messdaten erzeugt. Dazu sind verschiedene Einzelschritte nötig, die im Folgenden zusammenfassend beschrieben werden.

Folgende Einzelaspekte wurden bearbeitet:

### Sensordefinition und -parametrierung

Abbildung 2-3 zeigt das Prinzip der Abbildungsgeometrie zur Simulation eines PMD-Sensors.

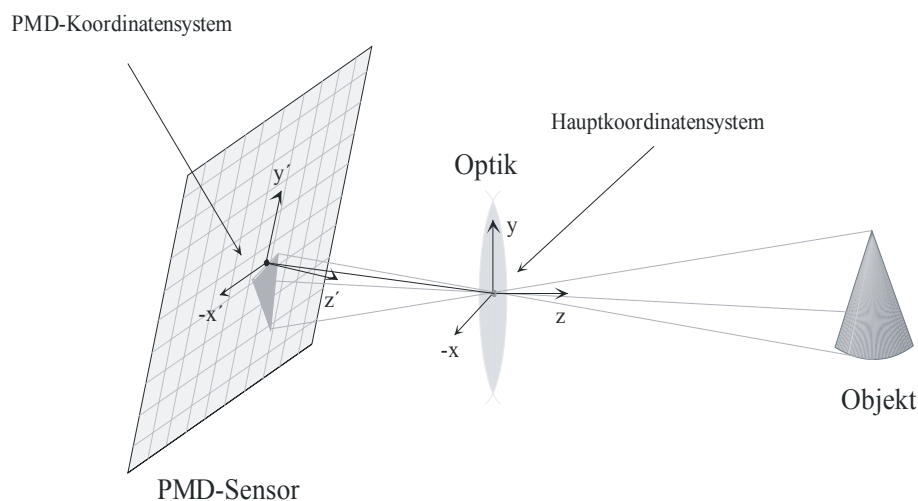


Abbildung 2-3: Prinzip des PMD-Simulators

Der PMD-Sensor wird idealisiert als eine rechteckförmige Pixelmatrix der Größe  $n \times m$  angenommen. Die PMD-Sensormatrix ist konstruktiv in das optische Subsystem integriert und kann beispielsweise gegenüber den Hauptachsen des Systems verkippt und verdreht sein.

*Das Grundprinzip des PMD-Simulators in Stichworten:*

- Realisierung der Pixel des PMD-Chips durch Eckpunkte eines Gitters der Größe  $(n+1) \times (m+1)$
- Realisierung des aktiven Bereichs des Sensors (man spricht in diesem Zusammenhang vom sog. Füllfaktor) durch variierbare Begrenzung der aktiven Pixelfläche
- Realisierung der Empfangsoptik (bikonvexe Sammellinse) durch Simulation des Brennpunktes der Linse
- Realisierung der Verschiebung und/oder Verdrehung der Sensor-Chipfläche gegenüber der Empfangsoptik mit Hilfe eines weiteren PMD-Koordinatensystems
- Freie Festlegung der Sensorparameter wie Auflösung, Chipgröße, Pixelgröße, Füllfaktor, Brennweite, Neigung, Modulationsfrequenz usw.

Der Simulator gestattet eine freie Anordnung des Sensors, kann die wesentlichen inneren Parameter eines optischen Messsystems darstellen und gestattet somit auch die Entwicklung von Parametrierungs- und Kalibrierungsverfahren.

### Einlesen bzw. Generieren der Datensätze

Zum Einlesen einer referenzierten 3D-Szene wurde eine Schnittstelle konzipiert und realisiert, die je nach eingestelltem Modus (Simulation eines Frames oder einer ganzen Szene), eine oder mehrere ASCII-Dateien mit 3D-Objekten und Koordinaten einliest. Die dadurch gewonnenen Koordinaten (x-, y- und z- Koordinaten) der 3D Objekte dienen in der Folge als Eingangsdaten des Simulators.

### Koordinatensysteme

Um eine eventuelle Verschiebung und/oder Verdrehung der Sensor-Chipfläche gegenüber der Empfangsoptik realisieren und simulieren zu können, wurden zwei Koordinatensysteme eingeführt – das Hauptkoordinatensystem, in dem alle Berechnungen letztendlich durchgeführt werden, und das PMD-Koordinatensystem, in dem der Sensor definiert wird.

### Theoretische Antwort des PMD-Sensors

Das Prinzip aller optischen Entfernungsmesssysteme beruht auf der Messung der Signallaufzeit  $\tau_L$  des gesendeten Signals. Aus dieser lässt sich der Abstand, unter der Annahme, dass die Lichtquelle sich am selben Ort wie der Empfänger befindet, wie folgt bestimmen.

$$R = \frac{c \cdot \tau_L}{2}$$

Hierbei kennzeichnet R den skalaren Abstand,  $\tau_L$  die Lichtlaufzeit und c die Lichtgeschwindigkeit. Unter der Voraussetzung einer kontinuierlichen sinus- oder rechteckförmigen Modulation (cw -Modulation) wird die Gleichung vereinfacht, so ergibt sich mit der Modulationsfrequenz  $f_{\text{mod}}$  für den Abstand R eines Messobjektes folgender Zusammenhang:

$$R = \frac{c \cdot \Delta\varphi}{4 \cdot \pi \cdot f_{\text{mod}}}$$

Der Phasenunterschied  $\Delta\varphi$  ergibt sich aus der Laufzeit des Lichtsignals zum Objekt und zurück zum Empfänger und hat folgenden mathematischen Zusammenhang:

$$\Delta\varphi = 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{mod}} \cdot \tau_L$$

Zusammengefasst lässt sich die Antwort eines PMD-Pixels wie folgt berechnen:

$$\vec{r}_c = \sum_{i=1}^N B_i \cdot e^{j4\pi \frac{r_i}{\lambda}}$$

wobei  $\vec{r}_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix}$  mit  $i=1\dots N$  die Abstandsvektoren zu allen 3D-Objektpunkten sind, die von dem PMD-Pixel „gesehen“ (erfasst) werden.  $r_i$  gibt die Länge des Vektors an.

$\lambda = \frac{c}{f_{\text{mod}}}$  ist die Wellenlänge des modulierten Signals,  $B_i$  – Rückstreuoeffizient des 3D-

Objektpunktes. Der PMD-Sensor ist nicht in der Lage, die einzelnen 3D-Objektpunkte, die auf den gleichen Pixel abgebildet werden, zu unterscheiden: Pro Pixel sieht der PMD-Sensor nur einen Objektpunkt mit der Helligkeit (Amplitude)  $A_m = |\vec{r}_c|$ , und einer Phase  $\varphi = \arg(\vec{r}_c)$ , aus der sich die Entfernung dieses Objektpunktes ergibt. Die Antwort eines Pixels ist demnach ein Vektor, aus dessen Betrag sich die scheinbare Helligkeit

und aus dessen Phase über die Signallaufzeit die Entfernung  $R$  berechnet wird. Die Position dieses Objektpunktes im 3D-Raum ergibt sich dann aus dem Abstand  $R$  und der Richtung des Vektors vom Ursprung des Hauptkoordinatensystems zum Mittelpunkt des Öffnungswinkels der Pixelfacette (Abbildung 2-4).

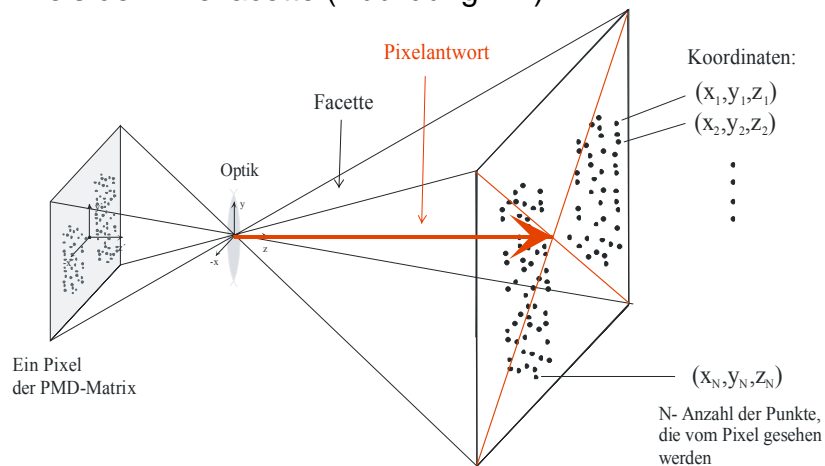


Abbildung 2-4: Generierung der Antwort eines PMD-Pixels

Die gesamte Antwort des Sensors setzt sich aus den Antworten der einzelnen Pixel der Pixelmatrix zusammen. Man erhält auf diese Weise zwei Matrizen mit Amplituden- und Entfernungswerten. Um die Antwort des Sensors exakt berechnen zu können, bedarf es einerseits der Information, welche Punkte eines Objektes vom Pixel  $(m,n)$  „gesehen“ werden, d.h. die ganze 3D-Szene muss pixelweise sortiert werden, und andererseits der Aussortierung der für den Sensor unsichtbaren Bereiche, da sonst in die Berechnung Objektpunkte hineinfließen, die die Antwort des Sensors stark verfälschen können.

## 2.3 Literatur zum Stand der Forschung und eigenen Vorarbeiten

### PMD-Sensorik und Abstandsmesstechnik

- [1] INV Siegen 'Industrielle Füllstandsmessung nach dem Laserpuls-Laufzeitverfahren', Abschlußbericht des Forschungsprojektes im Auftrag der Firma Krohne, Duisburg unter Förderung durch das AIF (F.u.E.-Projekt 2610), Siegen, Juli 1986.
- [2] INV, MBB 'Laser Diode Rangefinder Demonstration Model', Final Report, ESTEC Contract Number 5159/82/NL/HP, March 1985.
- [3] BMFT-Verbundprojekt 'Intelligente Sensorsysteme für die Handhabungstechnik (FT 2.420) ', Protokoll- und Ergebnisberichte der Verbundteilnehmer, halbjährlich bis März 1988.
- [4] Schwarte, R., Baumgarten, V., Bundschuh, B., Graf, W., Hartmann, K., Heuten, F., Loffeld, O., 'Implementation of an Advanced Laser Ranging Sensor Concept', Proc. IAF Conference, Stockholm, 1985.
- [5] Schwarte, R., Baumgarten, V., Bundschuh, B., Dänel, R., Graf, W., Hartmann, K., Heuten, F., and Loffeld, O., 'A New Concept for a Precise and Versatile Laser Range Finder and Optical Radar', Proc. of the Laser 87 Conf., München, 1987.
- [6] Schwarte, R., Aller, I., Baumgarten, V., Bundschuh, B., Graf, W., Hartmann, K., Loffeld, O., 'Neuartige Sensorsysteme, Laserradar mit Impulslaufzeitmessung', in 'Intelligente Sensorsysteme in der Fertigungstechnik', Fachberichte Messen - Steuern - Regeln, Springer Verlag, Berlin, 1989.
- [7] Tran Duc, L., Loffeld, O., 'Theoretische und experimentelle Untersuchung und Verifikation neuer Messwertverarbeitungsalgorithmen für die schnelle, dreidimensionale Objekterfassung', Forschungsbericht für die Alfred Krupp von Bohlen und Halbach-Stiftung, Essen, 1987.
- [8] DFG-Arbeitsstreffen „Technisches 3D-Sehen auf der Basis der PMD-Technologie“ am 07.10.2004 an der Universität Siegen, [www.3d-view.org](http://www.3d-view.org)
- [9] Schwarte, R.; Aller, I.; Baumgarten, V.; Bundschuh, B.; Graf, W.; Hartmann, K.; Loffeld, O.: Laserradar mit Impulslaufzeitmessung. In: J. Rogos (Hrsg.): „Intelligente Sensorsysteme in der Fertigungstechnik“. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo Hong Kong, 1989.
- [10] Ley, D.; Bundschuh, B.: Methoden der industriellen Bildverarbeitung. Vortrag beim Workshop: „Laseroptische und bildgebende Sensorsysteme für die industrielle Messtechnik“ im Zentrum für Sensorsysteme der Universität Siegen, Dezember 1992.
- [11] Lange, Robert: 3D time-of-flight distance measurement with custom solid-state image sensors in CMOS, CCD technology. Siegen, Univ., Diss., 2000.
- [12] Fa. CSEM, Zürich, [www.csem.ch/fs/vision.htm](http://www.csem.ch/fs/vision.htm)
- [13] Hartmut Surmann, Kai Lingemann, Andreas Nüchter, Joachim Hertzberg: Aufbau eines 3D-Laserscanners für autonome mobile Roboter. GMD Report 126, GMD - Forschungszentrum Informationstechnik GmbH, 2001.
- [14] Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik: Telematik 2003. Tagung Siegen, 17. und 18. Juni 2003 / VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik. - VDI-Verl., Düsseldorf, 2003. - 235 S.: Ill., graph. Darst. - ISBN: 3-18-091785-7 A. - (VDI-Berichte ; 1785)
- [15] Girard, A.R.; de Sousa, J.B.; Hedrick, J.K.: An overview of emerging results in networked multi-vehicle systems. Decision and Control, 2001. Proceedings of the 40th IEEE Conference on, Volume: 2, 4-7 Dec. 2001, Page(s): 1485 -1490 vol.2
- [16] Ashokaraj, I.; Silson, P.; Tsourdos, A.: Application of an extended Kalman filter to multiple low cost navigation sensors in wheeled mobile robots. Proceedings of IEEE Sensors 2002.
- [17] Schwarte, R., Buxbaum, B., Mikrosensoriklösungen durch inhärent mischenden Photodetektor (Photonic Mixer Device-PMD), 11. Workshop – Mikrotechniken und Mikrosensoren für Umwelt, Biologie und Medizin, Jena 1999. Schwarte, R., 'Optoelektronische 3D-Messtechnik nach dem Laufzeitverfahren für industrielle Anwendungen', Proc. OPTO '94, ACS Organisations GmbH, Leipzig Mai. 1994
- [18] Schwarte, R., 'Neue Konzepte für die industrielle 3D-Objektvermessung nach dem Laufzeitverfahren', VDI/VDE GMA-Aussprachetag, GMA-Bericht 23, S.93-106, Düsseldorf Okt. 1994
- [19] Schwarte, R., Klein, R., 'A novel scheme for minimizing the error of delay time in a distance sensor', SPIE Proc. Sensors and Control for Automation, Volume 2247, p. 188-193, Europto '94, Frankfurt, June 1994
- [20] R.Schwarte; "Verfahren und Vorrichtung zur Bestimmung der Phasenund/ oder Amplitudeninformation einer elektromagnetischen Welle"; Patentschrift; Schwarte Rudolf Prof. Dr. Ing. (DE); 1996
- [21] R.Schwarte; "Eine neuartige 3D-Kamera auf Basis eines 2DGegentaktkorrelator-Arrays"; Tagungsband Symposium 'Aktuelle Entwicklungen und industrieller Einsatz der Bildverarbeitung'; MIT GmbH; Seite 273-278; Aachen; 1996
- [22] R.Schwarte; "Überblick und Vergleich aktueller Verfahren der optischen Formerfassung"; Tagungsband 'Optische Formerfassung'; DGFfP-VDI/VDEGMA; GMA-Bericht 30; Seite 1-12; 1997
- [23] R.Schwarte, H.Heinol, Z.Xu, J.Olk, W.Tai; "Schnelle und einfache optische Formerfassung mit einem neuartigen Korrelations-Photodetektor-Array"; Tagungsband 'Optische Formerfassung'; DGFfP-VDI/VDE-GMA; GMABericht 30; Seite 199-209; 1997
- [24] R.Schwarte, H.Heinol, B.Buxbaum, Z.Xu, T.Ringbeck; "Neuartige 3D Visionsysteme auf der Basis Layout-optimierter PMD-Strukturen"; tm-Technisches Messen 65 (1998); H. 7-8; Seite 264-271; 1998
- [25] R.Schwarte; "3D-Bildsensorik"; Tagungsband '10. Heidelberger Bildbearbeitungsforum' Schwerpunktthema: 3D-Bildaufnahme und -verarbeitung; Siegen; 1999;
- [26] R.Schwarte; "Ein Jahrzehnt 3D-Bilderfassung- Zielsetzungen, Fortschritte, Zukunftsperspektiven"; Tagungsband 'Optische Formerfassung'; DGFfPVDI/ VDE-GMA; GMA-Bericht 70; Beiheft; 1999
- [27] Schwarte, R., Heinol, H., Buxbaum, B., Ringbeck, T., Xu, Z., Hartmann, K., Principles of 3-D Imaging Techniques, Computer Vision and Applications, Volume 1, Sensors and Imaging, Academic Press, S. 374-393, Boston 1999.
- [28] Schwarte, R., Heinol, H., Buxbaum, B., Xu, Z., Ringbeck, T., Zhang, Z., Tai, W. . Hartmann, K., Kleuver, W. , Luan, X., Neuartige 3D-Visionssysteme auf der Basis Layout-optimierter PMD-Strukturen, TM - Technisches Messen, 7-8/98, R. Oldenbourg Verlag, S. 264-271, München 1998.
- [29] Schwarte, R., Buxbaum, B., Heinol, H., Xu, Z., Ringbeck, T., Zhang, Z., Novel 3D-vision systems based on Layout Optimized PMD-Structures, Kongreßband OPTO '98-Optische Sensorik Messtechnik Elektronik, AMA Fachverband für Sensorik, S.197-202, Erfurt 1998.

- [30] R. Schwarte, B. Buxbaum, Th. Ringbeck, Z. Xu, T. Gollewski: 3-D-Kamera für Mobile Telerobotik und Telemanipulation. In: Telematik 2003, VDI-Berichte 1785, Fachtagung, Juni 2003, Siegen, ISBN 3-18-091785-7, S. 105 - 114.
- [31] Schwarte, R., Heinol, H., Xu, Z., Buxbaum, B., Schulte, J., A New powerful sensory tool in Automotive Safety Systems Based on Photodetector Inherent Mixing by PMD, AMAA 2000,
- [32] Buxbaum, B., Schwarte, R., Ringbeck, T., Heinol, H., Xu, Z., Olk, J., Tai W., Zhang, Z., Luan, X., A new approach in optical broadband communication systems: A high integrated optical phase locked loop based on a mixing and correlating sensor, the Photonic Mixer Device (PMD), Kongreßband OPTO'98-Optische Sensorik Messtechnik Elektronik, AMA Fachverband für Sensorik, S. 59-64, Erfurt 1998.
- [33] Buxbaum, B., Schwarte, R., Charakterisierung eines neuartigen OE-Mikrosensors (PMD) mit breitem Anwendungspotential, 11. Workshop – Mikrotechniken und Mikrosensoren für Umwelt, Biologie und Medizin, Jena 1999.
- [34] Buxbaum, B., Schwarte, R., Konzept einer hochparallelen optischen Schnittstelle auf Basis der PMD (Photonic Mixer Device)-Technologie, 4. Workshop – Optik in der Rechentechnik, Jena 1999.
- [35] Buxbaum, B., Schwarte, R., Ringbeck, T., PMD-PLL Receiver Structure for Incoherent Communication and Ranging Systems, SPIE, Photonic East – Optical Wireless Communications II, Boston, 1999.
- [36] Buxbaum, B., Schwarte, R., Xu, Z., Heinol, H., Ringbeck, T., Schulte, J., Tai, W., Charge Transfer Simulation in PMD-Structures, Sensor 99 Proceedings, S. 427-432, Nürnberg 1999.
- [37] B. Buxbaum, R. Schwarte, B. Schneider, H. Heß, T. Ringbeck, W. Tai, M. Grothof, 'Optisches CDMA auf Basis der PMD-Technologie - Ein für unkorrelierte Datensignale blinder Empfänger', ORT 2000, Hagen 2000.
- [38] B. Buxbaum, R. Schwarte, 'Photonic Mixer Devices for sensing and computing', Eingeladener Vortrag auf der Jahrestagung der Optical Society of America (OSA 2001), Long Beach 2001.
- [39] B. Buxbaum, R. Schwarte, T. Ringbeck, M. Grothof, 'MSM-PMD as correlation receiver in an new multidimensional ranging system', SPIE- Laser Radar Techniques, Remote Sensing 2001, Toulouse 2001.
- [40] B. Buxbaum, R. Schwarte, K. David, M. Hildebrand, T. Ringbeck, M. Grothof, 'Wireless infrared LAN based on optical CDMA using a new high speed correlation receiver (MSM-PMD)', SPIE- Optical Wireless Communication IV, ITCOM 2001, Denver 2001.
- [41] B. Buxbaum, H. Hess, T. Ringbeck, R. Schwarte, 'The Photonic Mixer Device: New perspectives in optical wireless communication', Workshop "Optical MEMS and Integrated Optics", Dortmund 2001.
- [42] Ringbeck, T., Buxbaum, B., Layoutoptimierte PMD-Strukturen für die schnelle 3D-Erfassung, Tagungsband DGZfP/GMA – Optische Formerfassung, VDI/VDE-GMA, Stuttgart 1999.
- [43] Ringbeck, T., Schwarte, R., Buxbaum, B., Introduction of a new electrooptical phase locked loop in CMOS-technology, the PMD-PLL, SPIE, Photonic East – Optical Wireless Communications II, Boston, 1999.
- [44] T. Ringbeck, R. Schwarte, B. Buxbaum, X. Luan, T. Tai, Z. Zhang, 'A new Opto-electrical Phase Locked Loop for Phase / Frequency Detection in Rotation and Range Measurement Application', Proceedings Sensor 2001, Nürnberg 2001.
- [45] T. Ringbeck, R. Schwarte, B. Buxbaum, H. Heß, 'An Optical GMSK modem for Infrared Wireless Communication Based on a New Receiver Principle in CMOS-Technology', Photonic West - Optical Interconnects, San Jose 2001.
- [46] Heinol, H., Z. Xu, J. Schulte, Laufzeitbasierte 3D-Kamerasysteme - Smart - Pixel - Lösungen; Tagungsband DGZfP/GMA – Optische Formerfassung, VDI/VDE-GMA, Stuttgart 1999.
- [47] Heinol, H.G., Schwarte, R.; „Photomischdetektor erfasst 3D-Bilder“; Elektronik 12/99; WEKA Fachzeitschriften Verlag, S. 80-90, München 1999.
- [48] Lange, R., Seitz, P., Schwarte, R., Time-of-flight-Entfernungskamera in CMOS/CCD-Technik mit pixelintegrierten Lock-in-Verstärkern; Tagungsband DGZfP/GMA – Optische Formerfassung, VDI/VDE-GMA, Stuttgart 1999.
- [49] Lange R., Seitz, P., Schwarte, R., Time-of-flight range imaging with a custom solid-state image sensor, SPIE-EOS: Sensors, Sensor Systems, and Sensor Data Processing, München 1999.
- [50] X. Luan, R. Schwarte, Z. Zhang, B. Buxbaum, T. Ringbeck, H. Hess, '3D intelligent sensing based on PMD technology', SPIE- Laser Radar Techniques, Remote Sensing 2001, Toulouse 2001.
- [51] M. Hildebrand, K. David, B. Buxbaum, M. Grothof, R. Schwarte, 'A New Approach for Indoor Wireless Internet based on Diffuse Infrared', Proceedings of the IASTED "Wireless and Optical Communications 2001" Conference, ACTA Press, Anaheim, Calgary, Zürich, 2001, ISBN 0-88986-287-7.
- [52] H. Heß, M. Albrecht, R. Schwarte, 'PMD - New Detector for Fluorescence Lifetime Measurement', Kongreßband OPTO'2002, AMA Fachverband für Sensorik, Erfurt 2002.
- [53] M. Grothof, R. Schwarte, B. Buxbaum, T. Ringbeck, J. Frey, 'Product Monitoring with MSM-PMD-Array', Kongreßband OPTO'2002, AMA Fachverband für Sensorik, Erfurt 2002.
- [54] Xu, Z., Schwarte, R., Heinol, H., Buxbaum, B., Ringbeck, T., Smart pixel - photonic mixer device (PMD), New system concept of a 3D-imaging camera-on-a-chip, 5th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice, S. 259-264, Nanjing 1998.
- [55] Z. Xu: Investigation of 3D-Imaging Systems based on Modulated Light and Optical RF-Interferometrie (ORFI). Dissertation, INV, Universität Siegen, 1999.
- [56] Z. Zhang, H. Heß, T. Ringbeck, R. Schwarte, 'Phase-Lock techniques using new correlation receivers for TOF-laser ranging', SPIE- Aero Sense 2002, Orlando 2002.
- [57] Janabi-Sharifi, F.: Collision: modelling, simulation and identification of robotic manipulators interacting with environments. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 1995.
- [58] H. Roth, R. Schwarte, N. Ruangpayoongsak, J. Kuhle, M. Albrecht, M. Grothof, H. Heß: 3D Vision Based on PMD-Technology for Mobile Robots. Proceedings SPIE Aerosense conference 2003, Volume "Unmanned Ground Vehicle Technology", Paper 5083-66, Orlando, Florida, 2003.

## 2D/3D-Bildverarbeitung allgemein

- [59] J.K.Aggarwal, C.C.Chu; "The Issues, Analysis, and Interpretation of Multi-Sensor Images"; Multisensor Fusion for Computer Vision; Springer Verlag; Page 37-62; 1989;
- [60] S.Christie; S.L.Hill, B.Bury, J.O.Gray, K.M.Booth; "Design and Development of a Multi-Detecting Two-Dimensional Ranging Sensor"; Meas. Sci. Technol.; Vol. 6; IOP Publishing Ltd; Page 1301-1308; 1995
- [61] C.C.Chu, N.Nandhakumar, J.K.Aggarwal; "Image Segmentation using Laser Radar Data"; Pattern Recognition; PR(23); No. 6; Page 569-581; 1990
- [62] J.E.Cryer, P.S.Tsai, M.Shah; "Combining Shape from Shading and Stereo Using Human Vision Model"; Department of Computer Science; Technical Report; CS-TR-92-25; 1992

- [63] J.E.Cryer, P.S.Tsai, M.Shah; "Integration of Shape from Shading and Stereo"; Pattern Recognition; PR(28); No. 7; Page 1033-1043; 1995
- [64] R.O.Duda, D.Nitzan, P.Barret; "Use of Range and Reflectance Data to Find Planar Surface Regions"; IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intelligence; PAMI(1); No. 3; Page 259-271; 1979;
- [65] O.D.Faugeras; "Three-Dimensional Computer Vision / A Geometric Viewpoint"; MIT Press; Seite 663 ff.; 1993
- [66] K.H.Franke, F.Gaßmann, D.Kollhoff, T.Machleidt; "Verfahren zur Bearbeitung von 3D-Daten"; Symposium 'Aktuelle Entwicklungen und industrieller Einsatz der Bildverarbeitung'; Aachen; MIT GmbH; 5/6.9.1996
- [67] B.Gil, A.Mitiche, J.K.Aggarwal; "Experiments in Combining Intensity and Range Edge Maps"; Computer Vision, Graphics, and Image Processing; CVGIP(21); No. 3; Page 395-411; 1983
- [68] S.Ghosal, R.Mehrotra; "Detection of Composite Edges"; IEEE Trans. Image Processing; IP(3); No. 1; Page 14-25; 1994
- [69] G.D.Godin, M.D.Levine; "Structured Edge Map of Curved Objects in a Range Image"; IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition; CVPR-89; Page 276-281; 1989
- [70] S.Gupta, R.Krishnapruam; "Morphologic Edge Detection in Range Images"; SPIE; Image Algebra and Morphological Image Processing II; Vol. 1568; Page 335-346; 1991
- [71] D.L.Hall; "Mathematical Techniques in Multi-Sensor Data Fusion"; Artech House Inc; 1992
- [72] A.Hanczak; "Fusion of Range and Intensity Data in a Scanning Sensor"; SPIE; Optics, Illumination and Image Sensing for Machine Vision VI; Vol. 1614; Page 231-239; 1992
- [73] R.Hoffman, A.K.Jain; "Segmentation and Classification of Range Images"; IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intelligence; PAMI(9); No. 5; Page 608-620; 1987
- [74] R.A.Jarvis; "A Perspective on Range Finding Techniques for Computer Vision"; IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intelligence; PAMI(5); No. 2; Page 122-139; 1983
- [75] Jarvis; "Range Sensing for Computer Vision"; 3D Object Recognition Systems, Advances in Communication 1; Elsevier Science Publishers B.V.; 1993
- [76] X.Y.Jiang, H.Bunke; "Range Data Acquisition by Coded Structured Light: Error Characteristics of Binary and Gray Projection Code"; SPIE; Optical 3D Measurement techniques II; Vol. 2252; Page 386-393; 1993
- [77] X.Jiang, H.Bunke; "Dreidimensionales Computersehen / Gewinnung und Analyse von Tiefenbildern"; Springer Verlag; 1997
- [78] R.Kimmel, A.M.Bruckstein; "Global Shape from Shading"; Computer Vision and Image Understanding; CVIU(62); No. 3; Page 360-369; 1995
- [79] R.Klette, A.Koschan; "Surface Reconstruction based on Visual Information"; Technical Report 95/6; Computer Vision Group FR 3-11; Department of Computer Science; 1995
- [80] R.Klette, A.Koschan; "Computer Vision / Räumliche Information aus digitalen Bildern"; Vieweg Technik; 1996
- [81] R.Lenz; "Grundlagen der Videometrie, angewandt auf eine ultrahochauflösende CCD-Farbkamera"; Technisches Messen; Nr. 57; Oldenbourg Verlag; 1990
- [82] J.Lu; "Ein dreidimensionales Bildverarbeitungssystem für die Automatisierung visueller Prüfvorgänge"; IPA-IAO, Forschung und Praxis' Band 180; Springer Verlag; 1993
- [83] J.Malik; "Interpreting Line Drawings of Curved Objects"; International Journal of Computer Vision; IJCV(1); No. 1; Page 73-103; 1987
- [84] M.J.Magee, J.K.Aggarwal; "Using Multisensory Images to Derive the Structure of Three-Dimensional Objects: A Review"; Computer Vision, Graphics, and Image Processing; CVGIP(32); No. 2; Page 145-157; 1985
- [85] M.J.Magee, B.A.Boyter, C.H.Chien, J.K.Aggarwal; "Experiments in Intensity Guided Range Sensing Recognition of Three-Dimensional Objects"; IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intelligence; PAMI(7); No. 6; Page 629-637; 1985
- [86] L.Matthies, R.Szeliski, T.Kanade; "Kalman Filter-based Algorithms for Estimating Depth from Image Sequences"; Multisensor Fusion for Computer Vision; Springer Verlag; Page 87-125; 1991
- [87] T.A.Mancini, L.B.Wolff; "3D-Shape and Source Location from Depth and Reflectance"; SPIE; Optics, Illumination, and Image Sensing for Machine Vision VI; Vol. 1614; Page 87-98; 1991
- [88] S.G.Nadabar, A.K.Jain; "Edge Detection and Labeling by Fusion of Intensity and Range Images"; SPIE; Applications of Artificial Intelligence X; Vol. 1708; Page 108-119; 1992
- [89] D.Nitzan, A.E.Brain, R.O.Duda; "The Measurement and Use of Registered Reflectance and Range Data in Scene Analysis"; Proceedings of the IEEE; PIEEE(65); No. 2; Page 206-220; 1977
- [90] H.H.Pien, J.M.Gauch; "A Variational Approach to Multisensor Fusion of Images"; Applied Intelligence; ApplIntel(5); No. 3; Page 217-235; 1995
- [91] R.Robmann, H.Bunke; "Ein kantenorientierter Ansatz zur Integration von Grauwert und Tiefenbildern"; Technical Report; IAM 93-016; 1993
- [92] R.Robmann; "Interpretation von Schatten- und Intensitätskanten in integrierten Grauwert- und Tiefenbildern"; Technical Report; IAM 94-007; 1994
- [93] J.Shah, H.H.Pien, J.M.Gauch; "Recovery of Surfaces with Discontinuities by Fusing Shading and Range Data within a Variational Framework"; IEEE Trans. Image Processing; IP(5); No. 8; Page 1243-1251; 1996
- [94] B.Straub; "Ein Verfahren zur Rekonstruktion von dreidimensionalen Objektmodellen aus digitalen Bildern"; Dissertation; Deutsche Geodätische Kommission; Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in Kommission bei der C.H.Beckschen Verlagsbuchhandlung München; 1991
- [95] C.H.Teh, R.T.Chin; "On the Detection of Dominant Points on Digital Curve"; IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence; PAMI(11); No. 8; Page 859-872; 1989
- [96] J.Wei; "Modellgesteuerte Szenen-Interpretation durch Fusion von Intensitäts- und Abstands-bildern"; Dissertation von J.Wei; Universität Karlsruhe; Fakultät für Informatik; 1989
- [97] J.Wei, P.Levi, U.Rembold; "Fusion of Range and Intensity Image Data for Recognition of 3D object surfaces"; Multisensor Fusion for Computer Vision; Springer Verlag; Page 171-194; 1989
- [98] J.Wei, P.Levi; "Entwicklung dreidimensionaler Fusionstechniken für Abstands- und Intensitätsbilder auf Basis eines doppelt synchronisierten Laser-Scanners"; Mustererkennung 1990; 12. DAGM-Symposium; Seite 316-323; 1990
- [99] N.Wilt; "Object-Oriented Ray Tracing in C++"; Wiley Professional Computing; 1994
- [100] R.J.Woodham; "Photometric Method for Determining Surface Orientation from Multiple Images"; Optical Engineering; OptEng(19); No. 1; Page 139-144; 1980
- [101] G.Zhang, W.J.Austin, A.M.Wallace; "Combining Depth and Intensity Processing for Scene Description and Object Recognition"; SPIE; Sensor Fusion V; Vol. 1828; Page 49-59; 1992
- [102] X.Zhang, D.Zhao; "Range Image Segmentation via Edges and Critical Points"; Spie; Visual Communications and Image Processing '95; Vol. 2501; Page 1626-1637; 1995

## Modellbildung und Simulation

- [103] Klaus, F., Loffeld, O., 'A Concept for the Simulation of SAR Data', Proc. IGARSS'91, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Helsinki 1991.
- [104] Li, A., Loffeld, O., 'Two Dimensional SAR Processing in the Frequency Domain', Proc. IGARSS'91, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Helsinki 1991.
- [105] Klaus, F., Loffeld, O., 'Simulation of Planetary Surfaces for a SAR Data Simulator', Proc. IGARSS'92, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Houston, 1992.
- [106] Klaus, F., Blewonska, U., Loffeld, O., 'Simulation of Shuttle Trajectory and Attitude for a SAR-Simulator', Proc. IGARSS'93, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Tokyo 1993.
- [107] Klaus, F., Simulation von Radar-Sensoren mit synthetischer Apertur, VDI Fortschrittsberichte, Reihe 8, Mess- Steuerungs- und Regelungstechnik, Nr. 447, 1995.
- [108] Nies, H., Loffeld, O., Gebhardt, U., Peters, V., Orbit Estimation of the Interferometric Cartwheel Using an Extended Linearized Kalman Filter, Proc. IGARSS'03, Toulouse 2003
- [109] Gebhardt, U., Loffeld, O., Nies, H., Peters, V., Orbit Modeling Related to Cartwheel Geometry“, Proc. IGARSS'03, Toulouse 2003
- [110] Knedlik, S., Loffeld, O., Nies, H., Gebhardt, U., On the Advantage of Intersatellite Ranging Systems for Orbit Estimation in Bistatic SAR, Proc. EUSAR'2004, Ulm, 2004.
- [111] Nies, H., Loffeld, O., Knedlik, S., A new Concept in Orbit Modeling Using a Decentralized Estimation Algorithm, Proc. EUSAR'2004, Ulm, 2004.
- [112] Gebhardt, U., Loffeld, O., Kalkuhl, M., Nies, H., Knedlik, S., "Orbit Tracking and Interpolation Using a Realistic Gravitation Model“, Conf. Proc. IGARSS'04, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Anchorage, Alaska, 2004,
- [113] Nies, H., Loffeld, O., Knedlik, S., Gebhardt, U., Wiechert, W., A Data Fusion Approach for Distributed Orbit Estimation, Proc. IGARSS'04, Anchorage, Alaska, 2004,
- [114] Gebhardt, U., Loffeld, O., Kalkuhl, M., Knedlik, S., Wiechert, W., (2004). Orbit Modeling for Calibration in Interferometric SAR, EUSAR 2004, Ulm/Germany

## Bildsensorik und Bildverarbeitung – eigene Vorarbeiten

- [115] Freisleben, B., D. Hartmann, et al. (1997). Parallel Raytracing: A Case Study in Partitioning and Scheduling on Workstation Clusters. Proceedings of the 30th Hawaii International Conference on System Sciences, IEEE Press.
- [116] M. Becker, 'Signal Processing for Reduction of Speckle-Noise in light-stripe-systems', SPIE Proc., Videometrics IV, Vol. 2598, Philadelphia Okt. 1996.
- [117] Bundschuh, B., 'Modellierung und systemtheoretische Beschreibung eines laseroptischen 3D-Konturerfassungsystems', Dissertation Universität-GH Siegen, FB12, Institut für Nachrichtenverarbeitung, 1991
- [118] D. D'Aria, A.M. Guarnieri, F. Rocca, „Focusing bistatic synthetic aperture radar using dip move out“, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 42, pp. 1362-1376, July 2004
- [119] R.Gerdes; "Dreidimensionales Messen mit einer Videokamera unter Ausnutzung geometrischer Randbedingungen"; Dissertation Universität-GH Siegen; VDI Verlag; Reihe 8; Nr 435; 1994
- [120] Hartmann, K., Ley, D., 'Erfassung von Bewegungszuständen mit Hilfe der Echtzeitbildfolgenanalyse', Proc., W. Ameling (Hrsg.) 7. Aachener Symposium für Signaltheorie ASST '90, Springer-Verlag, Berlin 1990
- [121] Hartmann, K., Weber, J., 'Multivision System for 3-D Measurement within Camera Vision', SPIE Proc., Sensor Fusion V, Vol. 1828, Boston, Nov. 1992
- [122] Heinol H., Xu Z., Schwarte, R., 'New optical 2D modulator jacked in rotational plastic optics', SPIE Proc., Design, Fabrication, and Applications of Precision Plastic Optics, Vol. 2600, Philadelphia Okt. 1995.
- [123] H.Heinol, Z.Xu, J.Schulte; "Laufzeitbasierende 3D-Kamerasysteme – Smart-Pixel-Lösungen"; Tagungsband 'Optische Formerfassung'; DGfFP-VDI/VDEGMA;GMA-Bericht 70; Beiheft; 1999
- [124] D.Justen, K.Hartmann; "3D-Image Processing through Grayscale Images and Distance Data Related to Individual Pixels"; SPIE; Visual Information Processing VIII; Vol. 3716; 1999
- [125] D.Justen, K.Hartmann, R.Schwarte; "3D-Bildverarbeitung auf Basis eines Grauwertbildes mit vereinzelt Entfernungsdaten"; Tagungsband 'Optische Formerfassung'; DGfFP-VDI/VDE-GMA; GMA-Bericht 70; Seite 249-258; 1999
- [126] D. Justen, „Untersuchung eines neuartigen 2D-gestützten 3D-PMD-Bildverarbeitungssystems“ Dissertation Universität-GH Siegen, 2001.
- [127] Kleuver, W., Fuß, M., 'Automatische Qualitätskontrolle von Rotgußteilen - Triangulationstechnik und Sichtkontrolle', Proc. OPTO '94, ACS Organisations GmbH, Leipzig ,Mai, 1994
- [128] Klicker, J., 'Ein zweidimensionales Triangulationsmesssystem mit Online-Messwertverarbeitung bei hoher Bildrate', Dissertation im Zentrum für Sensorsysteme der Universität-GH-Siegen, Juli 1992.
- [129] Klicker, J., Weller, U., 'Interactive Image Processing Tool for Experimental evaluation of Algorithms for Real-Time Video Signal Preprocessing'
- [130] Klicker, J., 'Triangulation als Basis für die 1D, 2D, 3D-Objektvermessung', VDI/VDE GMA-Aussprachetag, GMA-Bericht 23, S.185-194, Düsseldorf Okt. 1994
- [131] Ley, D., 'Intelligent Multisensor System for High-Speed and High-Precision 3D metrology', SPIE Proc., Sensors and Controls for Automated Manufacturing Systems, Vol. , Boston, Nov. 1993
- [132] Ley, Dietmar, 'Ein intelligentes Multisensorsystem zur berührungslosen Erfassung dreidimensionaler Konturen', Dissertation im Zentrum für Sensorsysteme der Universität-GH-Siegen, Juli 1992.
- [133] Loffeld, O., "Multisensorielle Signalverarbeitung / Data-Fusion und Kalman-Filter"; Hochschulinterne Veröffentlichung Universität-GH-Siegen; 1990
- [134] Loffeld, O., Nies, H., Peters, V., Knedlik, S., „Models and Useful Relations for Bistatic SAR Processing“, IEEE, Vol. 42, No. 10, Oktober 2004
- [135] Löcherbach, Edwin, '3D-Vision mittels Stereobildauswertung bei Videobildraten', Dissertation Universität-GH Siegen, FB12, Institut für Nachrichtenverarbeitung/Institut für Technische Elektronik, 1986
- [136] J.Olk; "Untersuchung von Laufzeitentfernungsmesssystemen unter besonderer Berücksichtigung des Referenzproblems"; Shaker Verlag; ZESS-Forschungsberichte; Bd. 5; 1997



- [137] R.Otterbach; "Robuste 3D-Objekterkennung und Lagebestimmung durch Auswertung von 2D-Bildfolgen"; Dissertation Universität-GH Siegen; VDI Verlag; Reihe 8; Nr. 481; 1995
- [138] E.Schubert; "Mehrfach farbcodierte Triangulationsverfahren zur topometrischen Erfassung und Vermessung von 3D-Objekten"; Dissertation Universität-GH Siegen; Shaker Verlag; ZESS-Forschungsberichte; Bd. 1; 1996
- [139] Schubert, E., 'Farbtriangulation-Einsatz von farbcodierter Beleuchtung zur 3D-Objekterfassung', Sensor '93 Kongreß, Band III, S 131-138, ACS Organisations GmbH, Nürnberg Okt. 1993
- [140] Schubert, E., Rath, H., Klicker, J., 'Fast 3D object recognition using a combination of color-coded phase-shift principle and color-coded triangulation', SPIE Proc. Sensors and Control for Automation, Volume 2247, p. 202-215, Europto '94, Frankfurt, June 1994
- [141] Schubert, E. Klicker, J., Schröder, A., 'Vision System for empty PET-bottle classification inside the box', SPIE Proc., Videometrics III, Vol. 2350, Boston, Nov. 1994
- [142] J.Weber; "Ein visuell unterstütztes, laseroptisches Multisensorsystem zur automatisierten Erfassung dreidimensionaler Objekte"; Dissertation Universität-GH Siegen; Shaker Verlag; ZESS-Forschungsberichte; Bd. 13; 1998
- [143] U.Weller, 'Non-tactile registration of process parameters in a continuous rolling process', SPIE Proc., Machine Vision Application, Architectures, and systems Integration II, Vol. 2140, Boston, Sep. 1993
- [144] U.Weller, St. Reinschmidt, 'Method for contactless measurement of process parameters in a continuous rolling process', Machine Vision Applications in Industrial Inspection III, San Jose, Feb. 1995.
- [145] Xu, Z., Bundschuh, B., Klaus, F., 'Simulation and optimization of aspheric lenses for advanced small sensor heads of large numerical aperture', SPIE Proc. Sensors and Control for Automation, Volume 2247, p 119-125, Europto '94, Frankfurt, June 1994
- [146] Xu Z., Heinol H., Schwarte, R., 'Enhanced multi-probing recovering algorithm based on color mixed nonlinear modulation and its application in a 3D vision system', SPIE Proc., Intelligent Robots and Computer Vision XIV, Vol. 2588, Philadelphia Okt. 1995.

### 3 Ziele und Arbeitsprogramm

Gegenstand der Arbeiten dieses Projektes ist die Entwicklung der system- und signaltheoretischen Grundlagen eines Simulations- und Referenzsystems einer 2D/3D-Kamera, bestehend aus PMD-Sensorik und CMOS/CCD-Sensorik.

#### 3.1 Systemtheoretische Betrachtung, Modellierung und Simulation eines CMOS/CCD-Sensors

Basierend auf den geleisteten Vorarbeiten auf dem Gebiet 2D/3D-Bildsensorik soll ein Simulationskonzept entwickelt werden, das es ermöglicht, aus einer in 3D gegebenen Szene eine 2D-Antwort zu simulieren, welche ein CMOS/CCD-Sensor, installiert auf einer innerhalb dieser Szene bewegten Plattform, von dieser Szene liefern würde. Die Analyse umfasst:

- a. Systemtheoretische Beschreibung eines CMOS/CCD-Sensors unter Berücksichtigung dessen mechanischer sowie optischer Eigenschaften
- b. Simulation von Helligkeits- (Farb-)daten

#### 3.2 Entwicklung und Implementierung eines softwarebasierten CMOS/CCD-Simulators / PMD-Simulators

Basierend auf den Modellierungsergebnissen von U.P. 3.1 und dem vorhandenen (idealisierten) Simulator (siehe U.P. 2.2.3) soll eine Erweiterung entwickelt und implementiert werden, die es ermöglicht, dass der Simulator sowohl Helligkeitsinformationen einer hochauflösenden CCD/CMOS-Kamera als auch Tiefeninformationen einer PMD-Kamera einer gegebenen Umgebung liefert. Beide Teilsensoren sollen flexibel in einem Gesamtsensorsystem positioniert und parametrisiert werden können. Der CMOS/CCD-Simulator sowie der PMD-Simulator sollen die mechanischen, optischen und alle anwendungsrelevanten Eigenschaften der jeweiligen Sensoren realitätsgetreu und präzise nachbilden. Gleichzeitig muss das Simulationssystem Referenzdaten erzeugen können, mit denen es möglich wird, dass die in einem weiteren Teilprojekt des Antragspakets entwickelten 2D/3D-Bildverarbeitungs- und Koregistrierungsansätze auf ihre Leistungsfähigkeit hin untersucht werden. Dieses Projekt schließt folgende Einzelschritte ein:

- a. Umsetzung aller wichtigen optischen und geometrischen Eigenschaften des CMOS/CCD- und PMD-Sensors im Simulator
- b. Realisierung einer freien Parametrisierung direkt im Simulator (Auflösung, Neigung, Füllfaktor usw.) oder durch externe Quellen (z.B. Parameter-Dateien)

## c. Simulation und Analyse von Helligkeits- und Tiefeninformationen

**3.3 Reale Verzerrungs- und Störeffekte**

In diesem Teilprojekt soll auf die spezielle Problematik des Messaufbaus aufgrund getrennter Beleuchtungs- und Empfangseinheiten (*bistatische Anordnung*) sowie auf spezifische Datenfehler, die sich bedingt durch Rauschen, Optik- und Laufzeitverzerrungen ergeben, erforscht, analysiert und simuliert werden.

**Bistatische Effekte**

Aufgrund des konstruktiv bedingten Abstandes zwischen dem Beleuchter und dem PMD-Sensor (bistatischer Aufbau) ergibt sich bei der Laufzeitmessung eine Verzerrung durch unterschiedliche Hin- und Rückwege des Lichtsignals. Die Formel zur Bestimmung des Abstandes  $R$  aus der Laufzeit  $t_{Lauf}$

$$R = \frac{c \cdot t_{Lauf}}{2}$$

gilt in diesem Zusammenhang nur näherungsweise für sehr große Abstände zum Zielobjekt bezüglich des Beleuchter-Sensor-Abstandes und verliert im allgemeinen bistatischen Fall ihre Gültigkeit. Hier setzt sich die gesamte vom Sendesignal zurückgelegte Strecke aus den Entfernungen Beleuchter – Objekt und Objekt – Sensor zusammen. Gemessen wird die Gesamtentfernung

$$\overline{BP} + \overline{PE} = \sqrt{P_x^2 + (B_y - P_y)^2 + (B_z - P_z)^2} + \sqrt{P_x^2 + (P_y - E_y)^2 + (P_z - E_z)^2},$$

gesucht sind die einzelnen Abstände zum Punktziel.

$P = (P_x, P_y, P_z)^T$  - Koordinaten des Punktziels ;  $B = (B_x, B_y, B_z)^T$  - Koordinaten des Beleuchters ;  $E = (E_x, E_y, E_z)^T$  - Koordinaten des Sensors;

$\overline{BP} + \overline{PE}$  – Abstände Beleuchter-Punktziel und Sensor-Punktziel

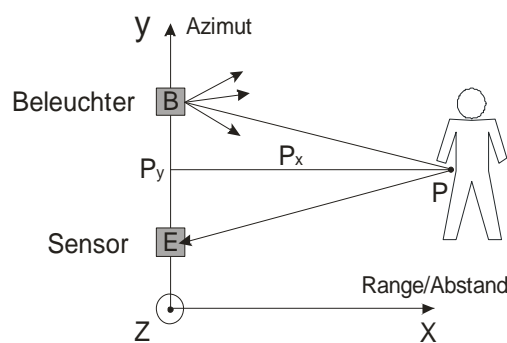


Abbildung 3-1: Bistatische Anordnung (E - Empfänger/Sensor, B- Beleuchter/Sender, P - Punktziel)

Um die Lage des Zielobjekts präzise bestimmen zu können, bedarf es der Lösung der bistatischen Gleichung. Ein viel versprechender Lösungsansatz dieses bisher ungelösten Problems wurde in [134] von Prof. Loffeld vorgestellt. Im Fall, dass der Sensor und die Beleuchtung auf der gleichen Plattform fest montiert sind und somit ihre Geschwindigkeitsvektoren gleiche Richtung und Betrag aufweisen, handelt es sich bei der Korrektur der bistatischen Deformation um den sog. *Rocca's Smile Operator* [118]. Nach [134] bleibt der bistatische Deformationsterm in die Azimut-Richtung konstant und muss nur

in die Range Richtung kompensiert werden. Ziel der Arbeiten ist die Untersuchung und die kritische Analyse der veröffentlichten Ansätze auf ihre Tauglichkeit sowie die Entwicklung neuer der Problemstellung angepasster Entzerrungsalgorithmen zur Korrektur der bistatischen Deformation.

### **Störsimulationen**

In der Realität erzeugen alle CCD/CMOS- und PMD-Sensoren ein so genanntes thermisches Eigenrauschen, das bei verschiedenen Chips durchaus signifikant unterschiedliche Messwerte zur Folge hat. Die von einem realen Sensor gelieferten Messwerte können als permanente Überlagerung von tatsächlichen (idealisierten) Messwerten und durch thermisches Rauschen verursachte Störungen angesehen werden.

Ein weiteres Problem ist die Pixel-nonuniformity. Trotz modernster Technik und hoher Qualität im Herstellungsprozess können die einzelnen Pixel eines optischen Sensors nicht exakt gleich groß hergestellt werden. Dies führt dazu, dass auch unter absolut gleichen Vorraussetzungen (z.B. Temperatur, Intensität des einfallenden Lichtes) benachbarte Pixel unterschiedliche Messwerte liefern. Dies wird noch mehr durch die eingesetzte Optik verstärkt, dessen Herstellung ebenfalls störungsbehaftet sein kann.

Um realitätsnahe Simulationen zu erhalten, müssen diese Effekte im Simulator ebenfalls nachgebildet werden.

Störsimulationen:

- a. Entfernungsrauschen
- b. PMD-Pixelnonuniformity
- c. PMD-Helligkeitsrauschen
- d. CMOS Störsimulation

### **3.4 Entwicklung und Implementierung eines Objekteditors**

Bei Modellierung und Simulation komplexer 3D-Szenen werden diese in der Regel als Überlagerung von einfacheren 3D-Szenen realisiert, die auch in Form einer Objektbibliothek ausgeführt sein können (Kapitel 3.5). Besonders in der Anfangsphase der Entwicklung und zur Verifizierung der Daten bedarf es u.a. einfacher geometrischer Figuren, die man in der Antwort des PMD-Sensors wieder finden würde. Um dem Benutzer des Simulators diese Aufgabe zu erleichtern, ist es sinnvoll, im Simulator selbst oder als Hilfsprogramm einen 3D-Objekteditor zu entwickeln. Die Aufgabe des Objekteditors besteht darin, auf eine einfache Art und Weise Arbeitsgegenstände und Arbeitsmittel als Objekte in einem Objektmodell zu erstellen, z.B. mit Hilfe einer grafischen Oberfläche, in der man die wichtigsten Parameter des Objektes eingeben kann, und dieses „simulatorgerecht“ zu machen. Diese Umformung beinhaltet eine Ausgabe der erstellten Objekte in Form von Punkten also als ein Vektor der Größe  $3 \times N$  (mit N-Anzahl der Punkte eines Objektes) ausgegeben werden müssen. Des Weiteren muss es möglich sein, ein Objekt zu skalieren und zu verschieben. Es ist ebenfalls denkbar, den Objekteditor mit einer Schnittstelle zum PMD-Simulator auszustatten. Dies hätte den Vorteil, dass eine eventuelle Verschiebung/Rotation der PMD-Kamera (des Sichtfeldes der Kamera) im Objekteditor berücksichtigt werden könnte und den Benutzer vor Eingabe falscher Parameter oder Koordinaten warnen würde.

### **3.5 Entwicklung und technische Umsetzung einer Objektbibliothek**

Erzeugung, Darstellung und Visualisierung von 3D-Szenen stellt einen wichtigen Teil der Simulation dar. Oftmals muss ein Versuch mit einer Szene oder auch Teilszenen mit unterschiedlichen Sensorparametern wiederholt durchgeführt werden. Besonders

zur Verifizierung und beim Vergleich der Ergebnisse ist es wichtig, ähnliche oder teilweise sogar exakte Testumgebungen zu schaffen. Aus diesem Grund ist die Erstellung einer Objektbibliothek von großem Vorteil. Bereits erstellte und in der Bibliothek vorhandene Objekte ließen sich in kürzester Zeit im Simulator einbinden. Die Abbildung 3-2 verdeutlicht die Realisierung der Objektbibliothek. Über eine gemeinsame Schnittstelle lassen sich 3D-Objekte oder auch ganze Szenen abrufen bzw. abspeichern. Die Bibliothek soll dynamisch aufgebaut werden, d.h. sie wird erst beim jeweiligen Aufruf des Programms diesem hinzugefügt und zeigt stetig den aktuellen Stand der Data Base an. Auf diese Weise wird gewährleistet, dass der Anwender nach einem etwaigen Update den Simulator nicht neu starten muss. Über eine grafische Ausgabe wird der Anwender beim Aufrufen über die in der Bibliothek bereits vorhandene Objekte informiert und kann diese in einer Liste auswählen.

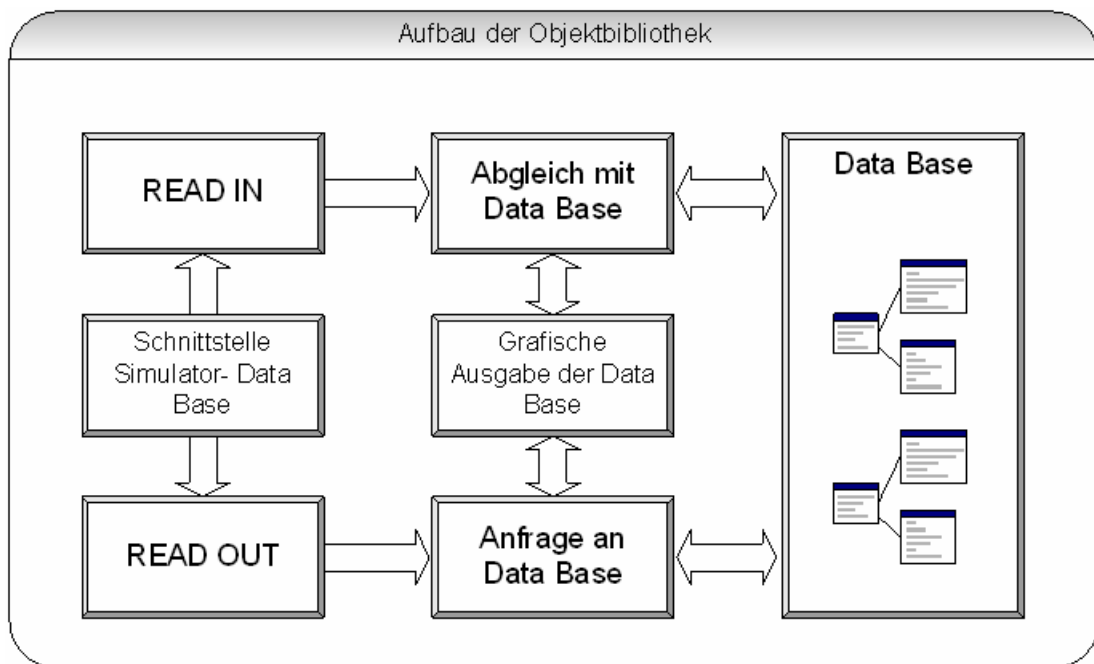


Abbildung 3-2: Prinzipieller Aufbau der Objektbibliothek

Des weiteren bleibt zu untersuchen, in wieweit für diese Aufgabe hervorragend geeignete und im Internet zahlreich vorhandene Open Source 3D-Objekte bzw. Modelle (z.B. VRML-Modelle) mit teilweise kompletten 3D-Szenen in die Bibliothek einbinden lassen. Dies wäre ein großer Schritt in die Richtung realitätsnaher Simulationen.

### 3.6 Entwicklung einer grafischen Benutzeroberfläche

Im Rahmen dieser Arbeit soll eine grafische Benutzeroberfläche (GUI) für den Simulator entwickelt werden, die die Parametrierung, die Dateneingabe und -ausgabe erheblich erleichtern soll. Es soll für den Benutzer möglich sein, zwischen zu generierenden und vorhandenen Datensätzen zu wählen. Die Parameter des Sensors (wie Art des Sensors, Auflösung, aktiver Bereich, Rotation und Verschiebung des Sensors gegenüber der Optik, Modulationsfrequenz) sollen entweder vom Benutzer direkt eingegeben oder auch aus einer Parameter-Datei (z.B. eine Initialisierungsdatei) eingelesen werden können. Die grafische Ausgabe der Ergebnisse soll in der GUI ebenfalls implementiert werden.

Ein wichtiger Teil dieser Arbeit besteht in der Realisierung anwendungsspezifischer Schnittstellen zum Datenaustausch zwischen den einzelnen Routinen, Programmen und Bibliotheken.

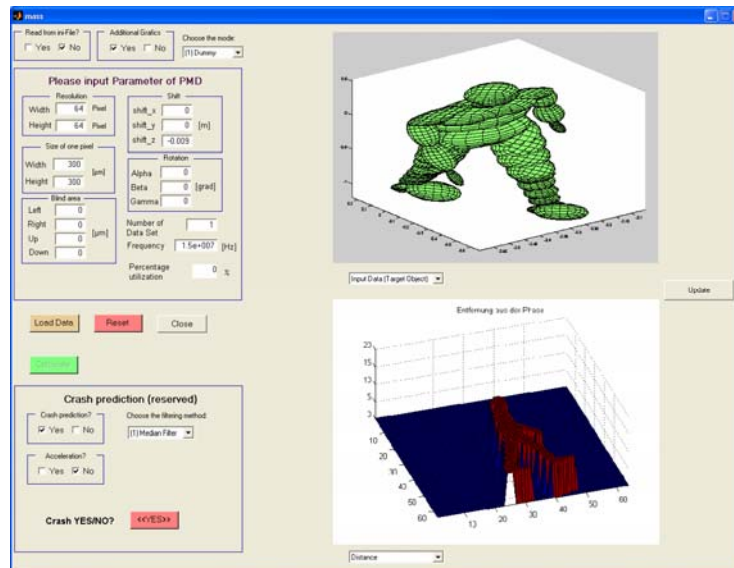


Abbildung 3-3: Beispiel einer Benutzeroberfläche zum Simulator

Die einzelnen Schritte umfassen:

- a. Entwurf und Realisierung eines benutzerfreundlichen graphischen Interfaces
- b. Implementierung der Schnittstellen
- c. Implementierung des CMOS/CCD-Simulators und des PMD-Simulators
- d. Realisierung grafischer Ausgaben

### 3.7 Optimierung der Algorithmen hinsichtlich der Rechenzeit

Mit steigender Komplexität der zu simulierenden Daten steigt nicht nur die Komplexität des Algorithmus, sondern auch das Volumen zu verarbeitenden Daten. Dies führt unabwendbar zu steigenden Rechenzeiten und Speicherbedarf. Während für Standardprobleme der Optimierung eine Vielzahl von Algorithmen zur Verfügung stehen, müssen bei komplex strukturierten Optimierungsproblemen anwendungsspezifische Algorithmen neu entwickelt, implementiert und auf ihre Effizienz getestet werden.

### 3.8 Arbeitsplan

Der Arbeitsplan folgt den in 3.1 bis 3.7 genannten Arbeitsschritten. Nachstehende Tabelle zeigt die zeitliche Anordnung der Einzelaufgaben in die verschiedenen Quartale im Laufe der Projektbearbeitung.

Nr. Arbeitsschritt	2006				2007				2008				2009			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
Modellierung eines CMOS/CCD-Sensors	X	X	X	X	X	X	X									
Entwicklung des CMOS/CCD- und des PMD-Simulators		X	X	X	X	X	X	X	X	X						
Bistatische Effekte und Störsimulationen					X	X	X	X	X	X	X	X	X			
Objekteditor					X	X	X	X	X	X	X	X				
Objektbibliothek					X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Benutzeroberfläche									X	X	X	X	X	X	X	X
Codeoptimierung								X	X	X				X	X	X
Dokumentation				X			X	X				X			X	X

### 3.9 Untersuchungen an Menschen

finden nicht statt.

### 3.10 Tierversuche

finden nicht statt.

### 3.11 Gentechnologische Experimente

finden nicht statt.

## 4 Beantragte Mittel

Zur Abschätzung des Gesamtvolumens wird auch eine ungefähre Kostenabschätzung für das 3. und 4. Förderungsjahr aufgeführt.

### 4.1 Personalbedarf

#### a) Anzahl und Dauer der wissenschaftlichen Mitarbeiterstellen

- 1,5 BAT IIa für die Dauer von zunächst 2 Jahren

**Begründung:** Für die Durchführung der Arbeiten sind gute Kenntnisse im Bereich von computergestützten Simulationen, Programmierung und Software-Technik (Objektmodellierung, Koordinatensysteme, Signalverarbeitung, Optimierung) erforderlich. Zudem muss ein intensiver Kommunikationsprozess mit den Projektpartnern in Gang gehalten werden und die Koordination der voneinander abhängigen Projekte gewährleistet werden. Vorzugsweise sollte das Projekt daher von einem Ingenieur betreut werden. Deutschsprachige Mitarbeiter aus dem Ingenieurbereich können bei diesen hohen Anforderungen allerdings nur mit einer vollen Stelle (BAT IIa) gewonnen werden. Konkret ist für diese Position Herr Dipl.-Ing. Valerij Peters vorgesehen, der seit Oktober 2002 als wissenschaftlicher Mitarbeiter im ZESS beschäftigt ist und unter anderem einen Simulatoransatz zum Einsatz des PMD in einer Bewegobjektsituation im Hinblick auf ein Fahrerassistenzsystem entwickelt hat. Ein zweiter wissenschaftlicher Mitarbeiter wird sich im Umfang von einer halben Stelle mit der signaltheoretischen Modellierung der realen Störphänomene in enger Zusammenarbeit mit der Firma PMDTec und dem Teilprojekt „Multi-Kamera“ beschäftigen. Die theoretische Modellbildung bistatischer Effekte und insbesondere von Mehrfachbeleuchtungen soll dabei in enger Kooperation mit der SAR-Gruppe des International Postgraduate Programmes Multi Sensorics erfolgen.

#### b) Anzahl und Dauer der studentischen Hilfskraftstellen

2 studentische Hilfskräfte mit je 40h/Monat für die Dauer von 2 Jahren

**Begründung:** Viele periphere Komponenten des zu entwickelnden Simulationssystems (Visualisierung, Datenschnittstellen, Datenauswertung) sowie die Erstellung konkreter Szenarien und Seriensimulationen können auch von Hilfskräften ausgeführt werden. Dafür sollen nach Möglichkeit ein Informatik- und ein Ingenieur-Student gewonnen werden. Zur Unterstützung der Doktoranden werden daher entsprechende Hilfskraftmittel beantragt.

## Geschätzter Aufwand im 3. und 4. Förderungsjahr

### a) Anzahl und Dauer der wissenschaftlichen Mitarbeiterstellen

- 1,5 BAT IIa für 2 Jahre

### b) Anzahl und Umfang der studentischen Hilfskräfte

2 studentische Hilfskräfte mit je 40h/Monat für die Dauer von 2 Jahren

## 4.2 Wissenschaftliche Geräte

### a) Geräte über 10.000,- EUR

Es kann die gesamte vorhandene Infrastruktur des ZESS und des FOMAAS<sup>2</sup> genutzt werden. Zusätzlich ist aber für die Aufgabenstellung realitätsnaher Simulationen die Beschaffung einer sehr leistungsfähigen Spezialworkstation notwendig, z.B.:

HP ProLiant DL580 (PC3200)

- Zwei AMD 852 Opteron 2,6GHz/1MB 64Bit Prozessoren
- 8GB PC3200 Arbeitsspeicher
- 10/100/1000 Mbit Ethernet Anschluss
- CD-ROM Laufwerk
- deutsche Tastatur
- PS/2-Maus
- HP 72.8GB Pluggable Ultra320 SCSI Festplatte, 15.000 rpm
- 4 Jahre Garantie

Summe inkl. Versand **ohne** MwSt.: lt. Angebot, siehe Anlage

16.867 €

### Begründung des Bedarfs:

Der Schwerpunkt des beantragten Forschungsvorhabens ist die simulative, rechenaufwändige Erzeugung von PMD-Entfernungs/Helligkeitsdaten und 2D-Helligkeitsdaten einer bewegten Szene. Die hohe räumliche Auflösung eines CMOS-Sensors in Verbindung mit der Simulation bewegter Szenen mit entsprechender Tiefendynamik, Tiefenauflösung und Bildrate bedingt dabei einen extrem hohen Berechnungsaufwand und zum anderen extreme Datenmengen, die sowohl im Arbeitsspeicher des Rechners verwaltet werden, als auch im Hintergrund abgespeichert werden müssen.

Die Programmentwicklung erfolgt aufgrund der Komplexität des Problems zunächst nur in einer leistungsfähigen Programmier- und Visualisierungsumgebung, wie Matlab. Dies entspricht dem international immer mehr praktizierten Standard, dass Prozessierungskonzepte erst nach Abschluss der eigentlichen Forschung und Entwicklung in eine lauffeieroptimale Hochsprache portiert werden<sup>3</sup>. Setzt man den durch die Verwendung von Programmier- und Visualisierungsumgebungen entstehenden Laufzeit-Overhead vorsichtig mit 50% an, wird unmittelbar deutlich, dass zur Implementierung und Verifikation der zu entwickelnden Modellierung und Verarbeitung eine Workstation mit hoher Rechenleistung, schneller Speicherperipherie und großem Massenspeicher unverzichtbar ist. Rechnersysteme mit einer durch das Betriebssystem unterstützten 64bit Architektur sind hier unbedingt notwendig. Aus Gründen der benötigten 64bit Hardware und Betriebssystemumgebung (TrueUnix64), aufgrund der Verfügbarkeit der Matlab-Software-

<sup>2</sup> FOMAAS= Forschungszentrum für Multidisziplinäre Analysen und Systemoptimierung

<sup>3</sup> Diese Portierung wird aber nicht als zentral für das beantragte Vorhaben angesehen.

Umgebung (mit Mehrprozessorunterstützung) als echte 64bit Umgebung für TrueUnix64 und aus Kompatibilitätsgründen mit der schon verwendeten Systemumgebung mit ca. 1 TByte Hintergrundspeicher kommt als unbedingt notwendige Erweiterung der Rechnerleistung nur die beantragte Konfiguration in Frage. Die Ankopplung an die Workstations der Benutzer zur Visualisierung erfolgt über Cygwin X-Window Clients, so dass die beantragte Konfiguration keine besonderen Grafikfähigkeiten besitzen muss. Die dadurch mögliche räumliche Trennung gestattet zudem die Ausstattung des beantragten Systems mit sehr schnellen (aber lauten) Festplatten.

**b) Geräte unter 10.000,- €**

3 MATLAB-Lizenzen (je 600 €)	1800 €
------------------------------	--------

**Begründung:** Am Lehrstuhl für Simulationstechnik (Prof. Wiechert) sind zwar 25 Ausbildungslizenzen für MATLAB vorhanden, diese dürfen aber nicht für Forschungszwecke eingesetzt werden. Für die Ausstattung der beiden Mitarbeiter und die Bereitstellung des Simulators bei den Projektpartnern (hier genügt eine Floating Lizenz) sind daher 3 MATLAB-Lizenzen erforderlich.

2 Mathworks-Simulink (je 450 €)	900 €
---------------------------------	-------

**Begründung:** Simulink ist eine Plattform für Simulation und modellbasierte Entwicklung dynamischer Systeme und wird bei der Entwicklung des Simulators benötigt.

Matlab Distributed Computing Engine (1 bis 8 Worker)	1250 €
--	--------

**Begründung:** Die Matlab Distributed Computing Engine ist eine Matlab Erweiterung, die es ermöglicht, auf einem Cluster oder Mehrprozessorsystem gleichzeitig voneinander unabhängige Matlab-Operationen auszuführen, um die Abarbeitung größerer Jobs zu beschleunigen.

2 Distributed Computing Toolbox (je 300 €)	600 €
--	-------

**Begründung:** Die Distributed Computing Toolbox ist eine Erweiterung zur Matlab Distributed Computing Engine (DCE). Diese kommuniziert als Client mit dem jeweiligen Jobmanager der DCE, der die parallele Verteilung der Programme über die Prozessoren erlaubt.

<b>Summe 4.2.</b>	<b><u>4550 €</u></b>
-------------------	----------------------

**Geschätzter Aufwand im 3. und 4. Förderungsjahr**

**a) Geräte über 10.000,- €**

keine

**b) Geräte unter 10.000,- €**

Update der MATLAB-Lizenzen	500 €
----------------------------	-------

<b>Summe 4.2.1. pro Jahr</b>	<b><u>500 €</u></b>
------------------------------	---------------------



## 5 Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens

Das thematische Zusammenwirken von **PMD-Sim** und den anderen Teilvorhaben des Antragspakets wird in Abbildung 5-1 veranschaulicht. Teilanträge des Pakets sind mit Rechtecken dargestellt und gelb hinterlegt. Die Interaktionen zwischen den einzelnen Teilprojekten sind durch schwarze oder blaue Pfeile gekennzeichnet. Schwarze Pfeile kennzeichnen einen Datenfluss oder Austausch von Daten und Verarbeitungsergebnissen, blaue Pfeile kennzeichnen gemeinsam bearbeitete Fragestellung und einen thematischen Erkenntnisgewinn.

- Simulierte Sensordaten und die entsprechenden (idealen fehlerfreien) Referenzdaten bilden eine frei parametrierbare Entwicklungs- und Testumgebung für die Algorithmenentwicklung im Teilprojekt **2D 3D Proc**. Die Modellbildung und Analyse des Bildgebungsprozesses erfolgt gemeinsam.
- Die in **MultiCam** entwickelten Kamerakonfiguration können in **PMD-Sim** simuliert werden. Simulierte Rohdaten können zu Testzwecken wieder in die Entwicklungsumgebung von **MultiCAM** zurückgespeist werden (Simulation in the loop). Umgekehrt ist die Einspeisung realer 2D/3D-Daten in die Simulationsumgebung möglich (Hardware in the loop). Die Erkenntnisse aus der Verarbeitung der simulierten Daten können in die Hardware-Optimierung einfließen. Der Erkenntnisfortschritt im Teilprojekt **MultiCAM** wird die Modellbildung für die Simulation wesentlich beeinflussen.
- Der in **PMD-Sim** entwickelte Simulator soll bei der Entwicklung von real nutzbaren THz-Systemen von **3D THz** Unterstützung mit Simulationen bieten.
- Die in **PMD-Sim** erzeugten 2D/3D Simulations- und Referenzdaten können darüberhinaus jedem Verarbeitungsteilprojekt anstelle realer Sensordaten zur Verfügung gestellt werden.

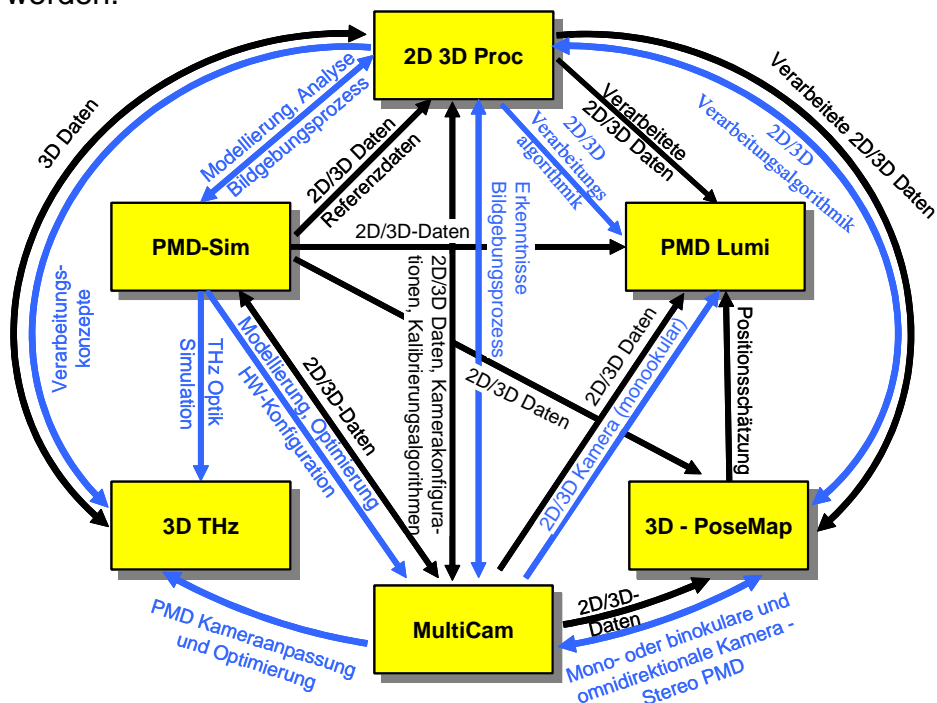


Abbildung 5-1: Funktionales und thematisches Zusammenwirken der Teilanträge

### 5.1 Zusammensetzung der Arbeitsgruppe

1. Prof. Dr.-Ing. habil. O. Löffel, Stellvertretender Vorsitzender des ZESS, Sprecher des IPP Multi Sensorics, Projektbereichsleiter PB2 im ZESS

2. Prof. Dr.-Ing. Andreas Kolb, Universitätsprofessor, Zentrum für Sensorsysteme, Lehrstuhl für Computergraphik und Multimediasysteme
3. Dipl.-Ing. Valerij Peters, PB2, ZESS (beantragt)
4. NN (50%, beantragt)
5. M. Sc. Anthony Amankwah, IPP Multi Sensorics, ZESS (Koregistrierung, SAR)
6. Dipl.-Ing. Marc Kalkuhl, IPP Multi Sensorics (Simulationstechnik)
7. M.Sc. Seyed Ghobadi, IPP Multi Sensorics (PMD/CMOS Systemtechnik)
8. M.Sc. T.D. Arun Prasad, IPP Multi Sensorics (PMD/CMOS Systemtechnik)
9. Dipl.-Ing. Omar Löprrich, IPP Multi Sensorics (Distributed 2D/3D Processing)
10. M.Sc. Koba Natroshvili, IPP Multi Sensorics (Bistatic SAR)

## 5.2 Zusammenarbeit mit anderen Wissenschaftlern

- Prof. Dr. Wolfgang Wiechert, Forschungszentrum für Multidisziplinäre Analysen und Angewandte Systemoptimierung (FOMAAS), Siegen
- Dr. Thorsten Ringbeck, PMDTechnologies, Siegen
- Dr. Robert Lange, PMDTechnologies, Siegen
- Dr. Wolfgang Weihs, Zentrum für Sensorsysteme
- Dr. Klaus Hartmann, Zentrum für Sensorsysteme

## 5.3 Arbeiten im Ausland und Kooperationen mit ausländischen Partnern

Center for Sensor Signal and Information Processing, Adelaide, Australien, Prof. Douglas Gray, Guest Lecturer im IPP Oktober 2006

## 5.4 Apparative Ausstattung

Der Projektbereich 2 des ZESS und das IPP bringen neben den räumlichen Voraussetzungen, die für ein solches Projekt erforderlich sind, auch seine gesamte Rechnerausrüstung, die allerdings auch in anderen Vorhaben benötigt wird, in das Vorhaben ein:

- 2 DEC alpha Professional Workstations XP1000 (667 MHz, 1,5 GByte RAM) mit TrueUnix64, ca. 1 TByte Hintergrundspeicher, Zugang über Cygwin X-Window Clients
- Diverse PCs (> 40) im heterogenen Netzwerk (Windows XP, Novel Netware), z.B. Dell Workstation PWS 530, 2\*Intel Xeon Prozessoren 2,2 GHz, 2,0 GByte RAM.
- 2 Novel Network Server (Dell 1,7 GHz)
- Kopplungen durch NFS (Unix) und SAMBA-Server (Unix↔Windows)
- Verschiedene Compiler u. Softwarepakete als Programmier- Datenanalyse- und -Visualisierungsumgebung (z.B. IDL, C++)

## 5.5 Laufende Mittel für Sachausgaben

ZESS wird die laufenden Mittel mit je 5.000 €/Jahr unterstützen.

## 6 Erklärungen

6.1 „Es bestehen keine thematischen Zusammenhänge zwischen dem Vorhaben und Arbeiten eines am Ort befindlichen Sonderforschungsbereiches.“

### 4.3 Verbrauchsmaterial

Datenträger für Speicherung und Transfer von Daten	pro Jahr	200 €
Hochw. Druckerpapier und Toner für einen vorh. Farbdrucker	pro Jahr	300 €
<b>Summe 4.3.</b>	<b>pro Jahr</b>	<b><u>500 €</u></b>

#### Geschätzter Aufwand im 3. und 4. Förderungsjahr

Datenträger für Speicherung und Transfer von Daten	pro Jahr	200 €
Hochw. Druckerpapier und Toner für einen vorh. Farbdrucker	pro Jahr	300 €
<b>Summe 4.3.1</b>	<b>pro Jahr</b>	<b><u>500 €</u></b>

### 4.4 Reisen

Austausch zwischen den Projektpartnern	pro Jahr	500 €
Präsentation von Forschungsergebnissen auf Tagungen	pro Jahr	4.000 €
<b>Summe 4.4</b>	<b>pro Jahr</b>	<b><u>4.500 €</u></b>

**Begründung:** Die Ergebnisse des Teilvorhabens sollen regelmäßig auf internationalen themenbezogenen Workshops und in reviewed journals veröffentlicht werden. Geplant ist konkret an die Teilnahme an den Tagungsreihen ASIM-Symposium (2006), European Simulation Multiconference (2006), EUROSIM (2007), EUSAR (2006), IGARSS (2007).

#### Geschätzter Aufwand im 3. und 4. Förderungsjahr

Austausch zwischen den Projektpartnern	pro Jahr	500 €
Präsentation von Forschungsergebnissen auf Tagungen	pro Jahr	4.000 €
<b>Summe 4.4.1</b>	<b>pro Jahr</b>	<b><u>4.500 €</u></b>

### 4.5 Publikationskosten

Veröffentlichungen in Zeitschriften und Tagungsbänden im Bereich Simulation und Visualisierung (farbig)	pro Jahr	500 €
<b>Summe 4.5</b>	<b>pro Jahr</b>	<b><u>500 €</u></b>

#### Geschätzter Aufwand im 3. und 4. Förderungsjahr

Veröffentlichungen in Zeitschriften und Tagungsbänden im Bereich Simulation und Visualisierung (farbig)	pro Jahr	500 €
<b>Summe 4.5.1</b>	<b>pro Jahr</b>	<b><u>500 €</u></b>

### 4.6 Sonstige Kosten

Keine

## 6 Erklärungen

6.1 „Es bestehen keine thematischen Zusammenhänge zwischen dem Vorhaben und Arbeiten eines am Ort befindlichen Sonderforschungsbereiches.“

6.2 „Ein Antrag auf Finanzierung dieses Vorhabens wurde bei keiner anderen Stelle eingereicht. Wenn wir einen solchen Antrag stellen, werden wir die Deutsche Forschungsgemeinschaft unverzüglich benachrichtigen.“

## 7 Unterschriften



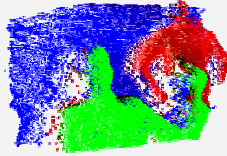
- Prof. Dr.-Ing. habil. O. Loffeld -



- Prof. Dr.-Ing. A. Kolb -

## 8 Verzeichnis der Anlagen

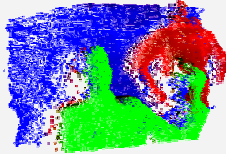
- Kurzprofile der Antragsteller Prof. Loffeld und Prof. Kolb
- Personalfragebogen für wissenschaftliche Mitarbeiter
- Einführender Artikel zum Photonic Mixer Device, PMD: H. Kraft, J. Frey, T. Moeller, M. Albrecht, M. Grothof, B. Schink, H. Hess and B. Buxbaum: "3D-Camera of High 3D-Frame Rate, Depth-Resolution and Background Light Elimination Based on Improved PMD (Photonic Mixer Device)-Technologies", OPTO, Nürnberg, Mai 2004.
- Kurzprofil des Zentrums für Sensorsysteme (ZESS) als zentrale wissenschaftliche Einrichtung der Universität Siegen
- IPP-Broschüre des DAAD
- Zwei Angebote vom 7.09.2005 für wissenschaftliche Geräte über 10.000,- €



## Kurzprofil

### Prof. Dr.-Ing. habil. Otmar Loffeld

<b>Geburtsdatum</b>	01.06.1955						
<b>Studium 1976 – 1982</b>	Elektrische Nachrichtentechnik an der RWTH Aachen						
<b>1982-1987</b>	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Nachrichtenverarbeitung der Universität-GH Siegen						
<b>Promotion, 1986</b>	‘Ein neuartiges ‘Switched Kalman-Filter’ mit geringer Wortbreite zur hochauflösenden Entfernungsmessung nach dem Laserpuls-Laufzeitverfahren’, Summa cum laude (mit Auszeichnung)’						
<b>1987-1989</b>	Hochschulassistent an der Universität-GH Siegen						
<b>Habilitation, 1989</b>	‘Grundlagen, Konzepte und Anwendungen der Estimationstheorie’						
<b>Forschungspreis NRW, 1990</b>	‘Doppler-Centroid-Estimation für X-SAR-Anwendungen mit Kalman-Filtern’						
<b>1991</b>	Professor für ‘Estimationstheorie und Digitale Signalverarbeitung’ Universität-GH Siegen						
<b>1995</b>	Gründung und Aufbau des Projektbereichs 2, ‘Optimale Signalverarbeitung- Multisensor Datenfusion, Remote Sensing - SAR’ im Zentrum für Sensorsysteme (ZESS) der Universität-GH Siegen.						
<b>Lehrgebiete:</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Allgemeine Nachrichtentechnik</li><li>• Nachrichtenverarbeitung</li><li>• Stochastische Modelle und Estimationstheorie</li><li>• SAR-Signalverarbeitung</li></ul>						
<b>Forschungs- u. Arbeitsgebiete:</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Optimale Signal- und Informationsverarbeitung- Estimationstheorie</li><li>• Multi-Sensor-Datenfusion (Motormanagement und Navigation)</li><li>• PMD-Signalverarbeitung</li><li>• Remote Sensing - SAR (SAR-Bildgewinnung und - Interferometrie)</li></ul>						
<b>Aktuelle Vorhaben</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Baseline-Kalibrierung für die Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)</li><li>• Bistatische Synthetic Aperture Radar Signalverarbeitung</li><li>• Environmental Exploration (E<sup>2</sup>N)</li><li>• TerraSAR-X</li><li>• Tandem-X Mission</li></ul>						
<b>Aktuell:</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Seit 2000 Stellvertretender Vorsitzender des Zentrums für Sensorsysteme (ZESS) der Universität Siegen, seit 1995 Projektbereichsleiter des Projektbereichs 2: Optimale Signalverarbeitung -Sensor Daten Fusion, Remote Sensing -SAR</li><li>• Seit 2002 Sprecher des IPP ‚Multi Sensorics‘, DAAD International Postgraduate Programme Multi Sensorics</li></ul>						
<b>Bisherige DFG-Vorhaben</b>	<table><tr><td>Integrierte 2D/3D-Geometrieprüfung und Szenenanalyse</td><td>DFG, Lo455/4-1, 1995-1996</td></tr><tr><td>Integrierte 2D/3D-Geometrieprüfung und Szenenanalyse</td><td>DFG, Lo455/4-2/3, 1996-1998</td></tr><tr><td>Synthetic Aperture Radar Datenfusion „SynFusion“</td><td>DFG, Lo455/5-1, 2000-2003</td></tr></table>	Integrierte 2D/3D-Geometrieprüfung und Szenenanalyse	DFG, Lo455/4-1, 1995-1996	Integrierte 2D/3D-Geometrieprüfung und Szenenanalyse	DFG, Lo455/4-2/3, 1996-1998	Synthetic Aperture Radar Datenfusion „SynFusion“	DFG, Lo455/5-1, 2000-2003
Integrierte 2D/3D-Geometrieprüfung und Szenenanalyse	DFG, Lo455/4-1, 1995-1996						
Integrierte 2D/3D-Geometrieprüfung und Szenenanalyse	DFG, Lo455/4-2/3, 1996-1998						
Synthetic Aperture Radar Datenfusion „SynFusion“	DFG, Lo455/5-1, 2000-2003						
<b>Weitere Informationen</b>	<a href="http://linuxpb2.zess.uni-siegen.de/pb2/">http://linuxpb2.zess.uni-siegen.de/pb2/</a>						



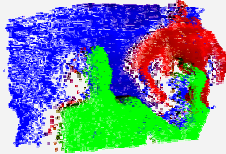
## Publikationsverzeichnis

Prof. Dr.-Ing.habil. O. Loffeld

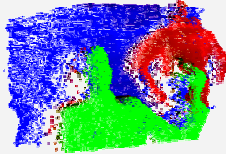
### 1.1. Veröffentlichungen als Coautor

1. INV Siegen 'Industrielle Füllstandsmessung nach dem Laserpuls-Laufzeitverfahren', Abschlußbericht des Forschungsprojektes im Auftrag der Firma Krohne, Duisburg unter Förderung durch das AIF (F.u.E.-Projekt 2610), Siegen, Juli 1986.
2. INV, MBB 'Laser Diode Rangefinder Demonstration Model', Final Report, ESTEC Contract Number 5159/82/NL/HP, March 1985.
3. BMFT-Verbundprojekt 'Intelligente Sensorsysteme für die Handhabungstechnik (FT 2.420) ', Protokoll- und Ergebnisberichte der Verbundteilnehmer, halbjährlich bis März 1988.
4. Schwarte, R., Baumgarten, V., Bundschuh, B., Graf, W., Hartmann, K., Heuten, F., Loffeld, O., 'Implementation of an Advanced Laser Ranging Sensor Concept', Proc. IAF Conference, Stockholm, 1985.
5. Schwarte, R., Baumgarten, V., Bundschuh, B., Dänel, R., Graf, W., Hartmann, K., Heuten, F., and Loffeld, O., 'A New Concept for a Precise and Versatile Laser Range Finder and Optical Radar', Proc. of the Laser 87 Conf., München, 1987.
6. Schwarte, R., Aller, I., Baumgarten, V., Bundschuh, B., Graf, W., Hartmann, K., Loffeld, O., 'Neuartige Sensorsysteme, Laserradar mit Impulslaufzeitmessung', in 'Intelligente Sensorsysteme in der Fertigungstechnik', Fachberichte Messen - Steuern - Regeln, Springer Verlag, Berlin, 1989.
7. Tran Duc, L., Loffeld, O., 'Theoretische und experimentelle Untersuchung und Verifikation neuer Meßwertverarbeitungsalgorithmen für die schnelle, dreidimensionale Objekterfassung', Forschungsbericht für die Alfred Krupp von Bohlen und Halbach-Stiftung, Essen, 1987.
8. Klaus, F., Loffeld, O., 'A Concept for the Simulation of SAR Data', Proc. IGARSS'91, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Helsinki 1991.
9. Li, A., Loffeld, O., 'Two Dimensional SAR Processing in the Frequency Domain', Proc. IGARSS'91, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Helsinki 1991.
10. Steinbrecher, U., Bamler, R., Runge, H., Loffeld, O., 'Performance Analysis of Kalman Filters For Doppler Centroid Estimation', Proc. IGARSS'91, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Helsinki 1991.
11. Hartmann, K., Loffeld, O., Li, A., Wiebusch, K., 'A Multiprocessor System For Synthetic Aperture Radar Focusing', Proc. International Conference on DSP Applications and Technology, Berlin, 1991.
12. Klaus, F., Loffeld, O., 'Simulation of Planetary Surfaces for a SAR Data Simulator', Proc. IGARSS'92, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Houston, 1992.
13. Klaus, F., Blewonska, U., Loffeld, O., 'Simulation of Shuttle Trajectory and Attitude for a SAR-Simulator', Proc. IGARSS'93, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Tokyo 1993.
14. Mahmoud, R., Loffeld, O., Hartmann, K., 'Multi -Sensor Data Fusion for Autonomous Guided Vehicles', SPIE International Conference on Sensors and Control for Advanced Automation II, Frankfurt, June, 1994
15. Xu Z., Bundschuh B., Schwarte R., Loffeld O., Klaus F., Heinol H., "Optimization of precision aspheric lenses for advanced small sensor heads of large numerical aperture", SPIE-Design, Fabrication, and Applications of Precision Plastic Optics, Vol. 2600, S. 158-165, Philadelphia 1995.
16. Xu Z., Heinol H., Schwarte R., Loffeld O., "An Enhanced Multi-probing Recovering Algorithm Based on Color Mixed Non-linear Modulation and its Application in a 3D-Vision System", SPIE-Intelligent Robots and Computer Vision XIV, Vol. 2588, S. 200-207, Philadelphia 1995.
17. Krämer, R., Loffeld, O., 'Phase Unwrapping for SAR Interferometry with Kalman Filters', Conf. Proceedings EUSAR'96, Königswinter 1996.
18. Krämer, R., Loffeld, O., 'A Novel Procedure For Outline Detection', Conf. Proceedings EUSAR'96, Königswinter 1996.
19. Klaus, F., Hein, A., Loffeld, O., 'Generating Interferometric SAR Raw Data Using SISAR', Conf. Proceedings EUSAR'96, Königswinter 1996.



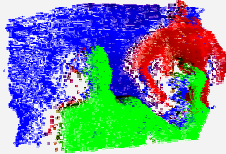


20. Krämer, R., Loffeld, O., 'Presentation of an improved Phase Unwrapping Algorithm based on Kalman filters combined with local slope estimation', Fringe'96, Zürich 1996.
21. Balzer, D., Arndt, Ch., Loffeld, O., 'Demodulation of Phase Modulated Signals using an expanded Observation Model in Kalman Filters', PIERS 96, Progress in Electromagnetics Research Symposium, 8-12 Juli 96, Innsbruck, Austria.
22. Arndt, Ch., Loffeld O., 'Information gained by Data-Fusion', Conf. Proc. EUROPTO'96, Conference on Sensors and Sensor-Systems, Besancon, 1996.
23. Arndt Ch., Loffeld O., 'Information gained by pseudoredundant Measurements', Conf. Proc. EUROPTO'96, Conference on Sensors and Sensor-Systems, Besancon, 1996.
24. Ganser, T., Scherer, M., Loffeld, O., 'Realization of a Multisensor data fusion algorithm of spark ignition engine control', Conf. Proc. EUROPTO'96, Conference on Sensors and Sensor-Systems., Besancon, 1996.
25. Scherer, M., Ganser, T., Loffeld, O., 'Data fusing for optimization of spark ignition engine control', Conf. Proc. EUROPTO'96, Conference on Sensors and Sensor-Systems., Besancon, 1996.
26. Xu Z., Bundschuh B., Schwarte R., Loffeld O., Klaus F., Heinol H., Klein R., 'Power transmittance of optimized aspherical lens with large numerical aperture', SPIE-Specification, Production, and Testing of Optical Components and Systems, Vol. 2775, S. 639-646, Glasgow 1996.
27. Xu Z., Bundschuh B., Schwarte R., Loffeld O., Klaus F., Heinol H., Klein R., 'Power transmittance of optimized aspherical lens with large numerical aperture', SPIE-Specification, Production, and Testing of Optical Components and Systems, Vol. 2775, S. 639-646, Glasgow 1996.
28. Xu Z., Heinol H., Schwarte R., Loffeld O., Klein R., Olk J., "Model of synthetic non-linear modulation and its algorithm for 3D color vision system", SPIE EOS-Design and Engineering of Optical Systems, Vol. 2774, S. 267-275, Glasgow 1996.
29. Li J., Loffeld O., Schwarte R., Buxbaum B., Xu Z., "Optimization of a laser ranging system in the case of colored noise", SPIE-Intelligent Robots and Computer Vision XV, Vol. 2904, S. 108-116, Boston 1996
30. Heinol H., Xu Z., Schwarte R., Loffeld O., "New Optical 2D-Modulator of large aperture for 3D-Vision systems", SPIE EOS -Design and Engineering of Optical Systems, Vol. 2774, S. 293-300, Glasgow 1996.
31. Arndt, Ch., Loffeld, O., 'Pseudoredundant Measurements in Nonlinear Mappings', ISIT 97, IEEE International Symposium on Information Theory, 29 June - 4 Juli 97, Ulm, Germany.
32. Arndt, Ch., Loffeld, O., 'How to create Pseudoredundant Measurements', SPIE Conference on Sensors and Sensorsystems, European Symposium on Lasers, Optics, and Vision for Productivity and Manufacturing, 16-20 June 97, Munich, Germany.
33. Arndt, Ch., Loffeld, O., 'Optimal weighting of Phase Data with varying Signal to Noise Ratio', SPIE Conference on Sensors and Sensorsystems, European Symposium on Lasers, Optics, and Vision for Productivity and Manufacturing, 16-20 June 97, Munich, Germany.
34. Balzer, D., Arndt, Ch., Loffeld, O.; 'C4x online demodulation of phase modulated signals using different Kalman Filters models', SPIE Conference on Sensors and Sensorsystems, European Symposium on Lasers, Optics, and Vision for Productivity and Manufacturing, 16-20 June 97, Munich, Germany.
35. Scherer, M., Arndt Ch., Loffeld, O. 'Influence of Manifold Pressure Pulsations to Mean Value Models in Air Fuel Ratio Control', 5th IEEE Meditteranean Conference on Control and Systems, 21-23 Juli 97, (<http://www.ecs.umass.edu/ece/djaferis/5thMED/>)
36. Arndt, Ch., Hein, A., Loffeld, O., 'Information Theory in Data Fusion', Conference 'Fusion of Earth data', The European Association of Remote Sensing Laboratories (EARSeL), Société des Electriciens et Electroniciens de France (SEE), Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris (ENSMP), 28-30 Januar 98, Sophia Antipolis, Frankreich
37. Hart, M., Ziegler, M., Loffeld, O., 'Adaptive Estimation of Cylinder Air Mass Using the Combustion Pressure, SAE, Conf. Proc., Detroit, Michigan, Feb. 1998.
38. Arndt, Ch., Loffeld, O., 'Information in SAR Images with Special Emphasis on Phase Information', International Conference Signal Processing and Communications, 11-14 Februar 98, Canary Islands, Spain (<http://www.gpds.ulpgc.es/icspc98>)

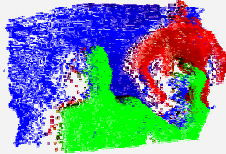


39. Balzer, D., Arndt, Ch., Loffeld, O., 'Improving Nonlinear Kalman Filters with different Adaptive Elements', IASTED International Conference Signal Processing and Communications, 11-14 Februar 98, Canary Islands, Spain (<http://www.gpds.ulpgc.es/icspc98>)
40. Hein, A., Loffeld, O., Arndt, Ch., 'Correcting Shadowing, Layover and Foreshortening Heighterrors in interferometric SAR-images', IASTED International Conference Signal Processing and Communications, 11-14 Februar 98, Canary Islands, Spain (<http://www.gpds.ulpgc.es/icspc98>)
41. Mittermayer, J., Moreira, A., Loffeld, O., 'The Frequency Scaling Algorithm for Spotlight Processing, IRS'98 München, 1998.
42. Mittermayer, J., Moreira, A., Loffeld, O., 'High precision processing of spotlight SAR data using the extended chirps scaling algorithm', EUSAR'98, Friedrichshafen, 1998.
43. Mittermayer, J., Moreira, A., Loffeld, O., 'Comparison of Stripmap and Spotlight Interferometric SAR Processing using E-SAR Raw Data, Proc. EUSAR'2000, München 2000.
44. Mittermayer, J., Moreira, A., Loffeld, O., 'Spotlight SAR Data Processing Using the Frequency Scaling Algorithm', IEEE Trans. On Geoscience and Rem. Sensing, Vo. 37, No. 5, Sep. 1999, pp. 2198 – 2214.
45. Knedlik, St., Loffeld, O., Hein, A., Arndt, Ch., 'A Novel Approach to Accurate Baseline Estimation', Proc. IGARSS'99, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Hamburg, 1999.
46. Knedlik, St., Loffeld, O., 'Analysis of different Maximum A Posteriori Estimation Approaches for Interferometric Parameter Calibration', Proc. IGARSS'2000, Honolulu, Hawaii, 2000.
47. Loffeld, O., Nies, H., Gebhardt, U., „Beschreibung des interferometrischen Cartwheels und dessen Vorteile zu Standard SAR-Verfahren“, TN-Cartwheel ZS/01, Technical Note SAFARI, Strategische Ausrichtung für raumgestützte Radar Instrumente, Dornier Satellitensysteme, 2000.
48. Ziegler, M., Hart, M., Loffeld, O., Scherer, M., Model-Based Calibration of Dynamic Plants in Engine Applications, ISATA 2000 on Automotive and Transportation Technology, ISATA 00AE021, Dublin, Ireland, 2000.
49. Knedlik, St., Loffeld, O., Arndt, Chr., Nies, H., 'Baseline Estimation from Orbit Data', PIERS 2001 (Progress In Electromagnetics Research Symposium), 2001, Osaka / Japan
50. Knedlik, S., Loffeld, O., Gebhardt, U., "Baseline Estimation using Phase Fringes and Ocean Elevation Models", Conf. Proc. AP-RASC '01 Asia-Pacific Radio Science Conference, Tokyo, Japan, 2001.
51. Knedlik St., Loffeld, O., Gebhardt, U., 'Baseline Estimation using Phase Fringes and Ocean Elevation Models', AP-RASC'01 (2001 Asia-Pacific Radio Science Conference), 2001, Tokyo / Japan.
52. Knedlik St., Loffeld, O., ' Baseline Estimation and Prediction referring to the SRTM', Proc. IGARSS'2002, Toronto, Canada, 2002.
53. Knedlik, St., Loffeld, O., Nies, H., "Sensitivity of DEMs Generated from Interferometric Cartwheel Configurations", Conf. Proc. IGARSS'03, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Toulouse 2003, ISBN: 0-7803-7930-6.
54. Nies, H., Loffeld, O., Gebhardt, U., Peters, V., "Orbit Estimation of the Interferometric Cartwheel Using an Extended Linearized Kalman Filter", Conf. Proc. IGARSS'03, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Toulouse 2003, 0-7803-7930-6
55. Gebhardt, U., Loffeld, O., Nies, H., Peters, V., "Orbit Modeling Related to Cartwheel Geometry", Conf. Proc. IGARSS'03, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Toulouse 2003, 0-7803-7930-6
56. Knedlik, S., Loffeld, O., Nies, H., Gebhardt, U., "On the Advantage of Intersatellite Ranging Systems for Orbit Estimation in Bistatic SAR", Conf. Proc. EUSAR'2004, Ulm, 2004.
57. Nies, H., Loffeld, O., Knedlik, S., "A new Concept in Orbit Modeling Using a Decentralized Estimation Algorithm", Conf. Proc. EUSAR'2004, Ulm, 2004.
58. Gebhardt, U., Loffeld, O., Kalkuhl, M., Nies, H., Knedlik, S., "Orbit Tracking and Interpolation Using a Realistic Gravitation Model", Conf. Proc. IGARSS'04, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Anchorage, Alaska, 2004,
59. Nies, H., Loffeld, O., Knedlik, S., Gebhardt, U., Wiechert, W., "A Data Fusion Approach for Distributed Orbit Estimation", Conf. Proc. IGARSS'04, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Anchorage, Alaska, 2004,



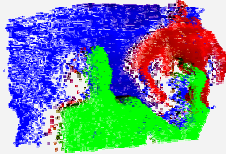


60. Haid, M.; Link, M., Loffeld, O., Marquardt, G., Melander, S., Schneider, U., , Inertial Low Cost Navigation with INS Error Modelling and Kalman Filter', Conf. Proc. Sensor 2005, Nürnberg, May, 2005.
61. Amankwah, A., Loffeld, O., "Image Registration by Subimage Selection and Maximization of Mutual Information", invited paper at IGARSS'05, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Seoul, Korea, 2005,
62. Medrano-Ortiz, A., Loffeld, O., Knedlik, S., Nies, H., Natroshvili K., , "Comparison of Doppler Centroid Estimators in Bistatic Airborne SAR", Conf. Proc. IGARSS'05, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Seoul, Korea, 2005.
63. Natroshvili, K., Loffeld, O., Nies, H., , "Bistatic SAR Processing – First Results", Conf. Proc. IGARSS'05, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Seoul, Korea, 2005.
64. Nies, H., Loffeld, O. Natroshvili, K. Walterscheid, I., Brenner, A., "Parameter Estimation for Bistatic Constellations", Conf. Proc. IGARSS'05, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Seoul, Korea, 2005.
65. Walterscheid, I., Ender, J. H. G., Brenner, A. R., Loffeld, O., 'Bistatic SAR processing using an omega-k type algorithm', Conf. Proc. IGARSS'05, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Seoul, Korea, 2005.
66. Kalkuhl M, Noh K, Loffeld O, Wiechert W, , "High precision simulation of near earth satellite orbits for SAR-applications", COMPUTATIONAL SCIENCE - ICCS 2004, PT 2, PROCEEDINGS LECTURE NOTES IN COMPUTER SCIENCE 3037: 228-235 2004
67. Walterscheid, I., Brenner, A. R., Ender, J. H. G., Loffeld, O., 'A bistatic airborne SAR experiment and processing results', Conf. Proc. IGARSS'05, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Seoul, Korea, 2005.
68. Uboldkosold, P., Knedlik, S., Loffeld, O., "Time Synchronization for Distributed Satellite Systems", Conf. Proc. IGARSS'05, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Seoul, Korea, 2005.
69. Knedlik, S., Loffeld, O., Ige, S. , "Determining Position and Attitude by GPS-Experimental Results", Proc. European Navigation Conference, GNSS2005, Munich 2005
70. Amankwah, A. Loffeld, O., "On Space and Search Strategies Data in Image Registration", Conf. Proc. IRS, Berlin, 2005.
71. Walterscheid, I., Brenner, A. R. Ender, J. H. G., Loffeld, O., , "A bistatic airborne SAR experiment and processing results", Conf. Proc. International Radar Conference, IRS'05, Berlin, 2005
72. Amankwah, A., Loffeld, O., "On Search Space and Search Data Strategies in Image Registration", Conf. Proc. Oceans 2005, Washington, 2005.
73. Gebhardt, U., Loffeld, O., Nies, H., , "Bistatic airborne/spaceborne hybrid experiment: Basic Considerations", Conf. Proc. SPIE International Symposium on Remote Sensing 2005, Brugge, Belgium

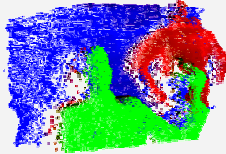


## 1.2. Veröffentlichungen als Autor

74. Loffeld, O., 'A Switched Kalman-Filter for the Implementation on Microprocessor Units for On-Line Applications', Proc. IASTED International Symposium, Applied Signal Processing and Digital Filtering', Paris, June 1985.
75. Loffeld, O., 'A Switched Kalman-Filter for the Implementation on Microprocessor Units for On-Line Applications', IASTED Microcomputer Applications Journal, Feb. 1987
76. Loffeld, O. and Hartmann, K., 'Technical Assistance For The Use Of Kalman Filtering in Spaceborne Laser Diode Rangefinders', Technical report, ESA/ESTEC Contract No. 6120/84/NL/PR, Noordwijk, 1986.
77. Loffeld, O., 'Kalman Filtering, Basic Concepts and Applications, An Introduction for Potential Users', Tutorial presented at the ESA/ESTEC meeting in Noordwijk, Dec. 1986
78. Loffeld, O., 'A New Switched Kalman Filter For 3D-Contourmeasuring With A Laser Diode Range Finder', Proc ASST'87, 6. Aachener Symposium für Signaltheorie, Informatik Fachberichte Nr. 153, Springer Verlag, Berlin, 1987.
79. Loffeld, O., 'Mathematical Model of the Shuttle's Attitude DLR Study Report, Contr. No. 5-565-4395, München, 1989.
80. Loffeld, O., 'Kalman Filtering for X-SAR Doppler Centroid Improvement, Part I, Kalman Filter Design', DLR Contract Report, Contr. No. 5-565-4408, München, 1989.
81. Loffeld, O., 'Kalman Filtering for X-SAR Doppler Centroid Improvement, Part II, Kalman Filter Implementation and Tests', DLR Contract Report, Contr. No. 5-565-4408, München 1989.
82. Loffeld, O., Estimationstheorie I, Grundlagen und stochastische Konzepte, Reihe 'Einführung in die Nachrichtentechnik' (Herausgeber A. Gottwald), Oldenbourg Verlag, München, 1990.
83. Loffeld, O., Estimationstheorie II, Anwendungen - Kalman-Filter, Reihe Einführung in die Nachrichtentechnik (Herausgeber A. Gottwald), Oldenbourg Verlag München, 1990.
84. Loffeld, O., 'Doppler Centroid Estimation With Kalman Filters', Conf. Proceedings IGARSS'90, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Washington, May 1990.
85. Loffeld, O., and Sack, A., 'Kalman Filters For The Demodulation Of Angular Modulated Signals', Proc. IEEE International Conference on Signal Processing '90, Beijing China, October 1990.
86. Loffeld, O., 'Doppler-Centroid-Estimation für Synthetic Aperture Radar im X-Band mit Kalman-Filtern', Beitrag zur Broschüre 'Forschungsland NRW - Thema Raumfahrt', im Auftrag des Ministers für Wissenschaft und Forschung des Landes NRW, 1990.
87. Loffeld, O., 'Estimating Time Varying Doppler Centroids with Kalman Filters', Proc. IGARSS'91, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Helsinki 1991.
88. Loffeld, O., 'Estimating Range and Time Varying Doppler Centroids with Kalman Filters', Proc. IGARSS'93, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Tokyo, 1993.
89. Loffeld, O. 'Demodulation of Noisy Phase or Frequency Modulated Signals with Kalman Filters', ICASSP'94, International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Adelaide, Australia, April, 1994.
90. Loffeld, O., 'Phase Unwrapping for SAR Interferometry with Kalman Filters', IGARSS'94, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Pasadena, Aug. 1994.
91. Loffeld, O., Hein, A., 'SAR Processing by 'Inverse Scaled Fourier Transformation'', EUSAR'96, Königswinter 1996.
92. Loffeld, O., Arndt, A., Hein, A., O. Loffeld, Ch. Arndt, A. Hein, 'Estimating the Derivative of Modulo-Mapped Phases', Fringe 96, Zürich 1996, (<http://www.geo.unizh.ch/rsl/fringe96/>)
93. Loffeld, O., Tewes, J., 'FM-Rate Estimation From Azimuth Chirp Data', EUSAR'96, Königswinter 1996.
94. Loffeld, O., Arndt, A, 'Estimating the Derivative of Modulo-Mapped Phases', ICASSP'97, München, 1997.
95. Loffeld, O., Schneider, F., Hein, A., 'Focussing SAR Images By Inverse Scaled Fourier Transformation', IASTED International Conference Signal Processing and Communications, 11-14 Februar 98, Canary Islands, Spain (<http://www.gpds.ulpgc.es/icspc98>).

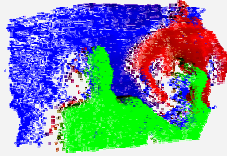


96. Loffeld, O., Hein, A., Schneider, F., 'SAR Focusing: Scaled Inverse Fourier Transformation and Chirp Scaling', IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS'98, 6-10 Juli 1998, Seattle WA, USA
97. Loffeld, O., Krämer, R., 'Phase Unwrapping for SAR Interferometry – A Data Fusion Approach by Kalman Filtering', Proc. IGARSS'99, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Hamburg, 1999
98. Loffeld, O., Knedlik, St., 'Tie Point Generation from Overlapping SAR Image Pairs by Kalman Filtering', Proc. IGARSS'2000, Honolulu, Hawaii, 2000
99. Loffeld, O., Nies, H., Peters, V., Knedlik, St., 'Models and Useful Relations for Bistatic SAR Processing', invited paper, IGARSS'03, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Toulouse, France, July 2003.
100. Loffeld, O., Nies, H., Gebhardt, U., Peters, V., Knedlik, S., "Bistatic SAR - Some Reflections on Rocca's Smile", Conf. Proc. EUSAR'2004, Ulm, 2004.
101. Loffeld, O., Nies, H., Peters, V., Knedlik, St., "Models and Useful Relations for Bistatic SAR Processing", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 42., No 10, October 2004.
102. Loffeld, O., Progress in SAR-Interferometry, Invited Paper Conf. Proc. FRINGE'05, 5. International Workshop on Automatic Processing of Fringe Patterns, ITO – Institut für Technische Optik Stuttgart & BIAS - Bremer Institut für Angewandte Strahltechnik. Stuttgart, Germany, September 11-14, 2005.

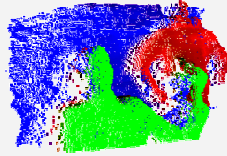


### 1.3. Eingeladene Vorträge

1. 'Kalman-Filter zur Konturvermessung mit einem Laserpuls-Laufzeitmeßgerät', Vortrag im Elektrotechnischen Kolloquium der Universität Siegen, Juni 1986.
2. 'Kalman-Filter, Theoretische Grundlagen und Anwendungen- eine Einführung', Vortrag bei der DLR Oberpfaffenhofen, Oktober 1987.
3. 'Kalman-Filter, Theorie und praktische Anwendungen', Vortrag im Elektrotechnischen Kolloquium der Universität Saarbrücken, Oktober 1987.
4. 'Kalman-Filter und optimale Konturestimationsalgorithmen zur Meßwertverarbeitung gestörter Entfernungsmessdaten', Vortrag im Elektrotechnischen Kolloquium der Technischen Universität Clausthal-Zellerfeld, Nov. 1987.
5. 'Mathematisches Zustandsraummodell zur Beschreibung des dynamischen Verhaltens der Shuttle-Lagewinkel', Vortrag auf dem X-SAR Review-Treffen, DLR Oberpfaffenhofen, Oberpfaffenhofen, Oktober 1989.
6. 'Kalman-Filter-Modellbildung zur Doppler-Centroid-Estimation, Kalman-Filter-Design und Ergebnisse', Vortrag auf der X-SAR-Harmonisierungs-Tagung, DLR Oberpfaffenhofen, Oberpfaffenhofen, Dezember 1989.
7. 'Doppler Centroid Bestimmung mit Kalman-Filtern', Vortrag im Ausscheidungsverfahren Forschungspreis NRW 1990, Bielefeld, Februar 1990.
8. 'Doppler Centroid Estimation for X-SAR Precision Processing, Actual Achievements and Results', X-SAR International Review Meeting, DLR Oberpfaffenhofen, Oberpfaffenhofen, Mai 1990.
9. 'Estimationstheorie, Bindeglied zwischen Modell und Wirklichkeit', Beitrag in der Ringvorlesung 'Wissenschaftliche Modelle - Abschied von der Wirklichkeit?', Siegen, Januar 1991
10. 'Kalman-Filter zur Demodulation von winkelmodulierten gestörten Signalen', Vortrag im Informationstechnischen Kolloquium der Technischen Universität München, Januar 1992.
11. 'Multisensorielle Datenverarbeitung, Data-Fusion und Kalman-Filter', Vortrag im Graduiertenkolleg Intelligente Systeme für die Informations- und Automatisierungstechnik an der Technischen Hochschule Darmstadt, Dezember 1992.
12. 'Demodulation winkel- und amplitudenmodulierter, gestörter Signale mit Kalman-Filtern', Vortrag im elektrotechnischen Kolloquium der Universität-Wuppertal, Juni 1994.
13. 'Multi-Sensor Data Fusion for Automated Guided Vehicles', eingeladener Vortrag im VDI-BMFT-Workshop zum Anwendungspotential der Nichtlinearen Dynamik, Frankfurt, November 1994.
14. 'SAR-Fokussierung durch 'Skalierte Inverse Fouriertransformation'', Vortrag im nachrichtentechnischen Kolloquium der Ruhr-Universität Bochum, Juni 1996.
15. 'SAR Interferometrie zur Erfassung von 3D-Oberflächenmerkmalen', Heidelberger Bildverarbeitungsforum, Siegen, März 1999.
16. 'SAR – Computer Vision mit Mikrowellen', ZESS Workshop: "Image Sensors und Bilderfassungssysteme", Siegen, Juni 1999
17. 'Synthetic Aperture Radar - kohärente Fotografie mit Mikrowellen', Vortrag im Kolloquium des Interdisziplinären Zentrums für Wissenschaftliches Rechnen der Universität Heidelberg; Heidelberg, Januar 2000.
18. 'SAR-Interferometrische Herausforderungen', Vortrag im Kolloquium der Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen der Technischen Universität München, Juni 2002.
19. 'From SRTM to Cartwheel – Calibration Challenges', Invited talk to 3. DLR/CNES Workshop 'Methods and Techniques for meter resolution', München, October 2002.
20. '3D-Imaging SAR', Eingeladener Vortrag zum VDI/VDE-Workshop Beurteilung bewegter 3D-Szenarien, Universität Siegen, Dezember 2002.
21. 'Bistatic SAR Processing and Rocca's ©', Invited talk to 4<sup>th</sup> DLR/CNES Workshop 'Methods and Techniques for meter resolution', München, November 2003.
22. 'Focusing Bistatic SAR – First Results', Invited talk to 5<sup>th</sup> DLR/CNES Workshop 'Methods and Techniques for meter resolution', München, December, 2004.



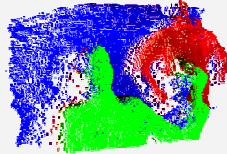
23. 'Progress in SAR-Interferometry', Invited Talk at FRINGE'05, 5. International Workshop on Automatic Processing of Fringe Patterns, ITO – Institut für Technische Optik Stuttgart&BIAS - Bremer Institut für Angewandte Strahltechnik. Stuttgart, Germany, September 11-14, 2005.
24. 'Recent Advances in Bistatic SAR Focusing' Invited talk to 6<sup>th</sup> DLR/CNES Workshop 'Methods and Techniques for meter resolution', München, Nov. 2005.



## Kurzprofil Prof. Dr.-Ing. Andreas Kolb

<b>Geburtsdatum</b>	04. 06. 65
<b>Abitur 1985</b>	Note 1.0
<b>1986-1992</b>	Mathematik –Studium (Diplom), Universität Erlangen-Nürnberg Abschlußnote: sehr gut
<b>1992-1995</b>	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Graphische Datenverarbeitung (Prof. Dr. Hans-Peter Seidel) der Universität Erlangen-Nürnberg
<b>Promotion, 1995</b>	Optimierungsansätze bei der Interpolation verteilter Daten Note: sehr gut
<b>1996-1998</b>	Entwickler und Projektleiter bei der Fa. debis Systemhaus Engineering GmbH, Leinfelden
<b>1998-2003</b>	Professor (C3) für Medieninformatik (Schwerpunkt Computergraphik) an der Fachhochschule Wedel
<b>Seit Oktober 2003</b>	Professur (C4) für Computergraphik und Multimediasysteme, Fachbereich Elektrotechnik und Informatik der Universität Siegen
<b>Lehrgebiete:</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Computergraphik</li><li>• Geometrische Modellierung</li><li>• Visualisierung</li><li>• Virtuelle Realität (VR)</li></ul>
<b>Forschungs- u. Arbeitsgebiete:</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Simulationen auf Graphikhardware</li><li>• Sensordatenverarbeitung und –fusion</li><li>• Rendering und Beleuchtungssimulation auf Graphikhardware</li><li>• Geometrische Modellierung, Modelloptimierung und -rekonstruktion</li></ul>
<b>Aktuelle Vorhaben:</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Interaktive Verarbeitung hochdynamischer und massiver 2D und 3D Daten im Bereich der SAR-Sensorik</li><li>• Interaktive Verarbeitung multimodaler 2D/3D-Sensordaten zur Modell- und Beleuchtungsrekonstruktion und zur 3D-Poseschätzung</li><li>• Effiziente Umsetzung von Modellierungs- und Simulations- algorithmen auf Graphikhardware</li></ul>
<b>Aktuell:</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 1998 Mitglied im GI-Fachbereich "Graphische Datenverarbeitung"</li><li>• Mitglied der EUROGRAPHICS Association seit 2001</li><li>• Mitglied bei ACM/SIGGRAPH seit 2002</li><li>• Programm- Komitees: Open SG Forum 2003, Web3D Symposium 2003</li><li>• Seit 2004 Mitglied im NRW Zentrum für Sensorsysteme (ZESS)</li><li>• Herausgeber einer Sonderausgabe des Journals „Simulation Practice &amp; Theory“ zum Thema „Programmable Graphics Hardware“</li><li>• Editorial Board Member Journal „Simulation Practice &amp; Theory“ seit 2005</li><li>• Reviewer u.a. für: SIGGRAPH, EUROGRAPHICS, ACM-TOG, CGF, CAD, CAGD, SIMPRA, IEEE-TSMC, IEEE-TGRS</li></ul>
<b>Weitere Informationen</b>	<a href="http://www.cg.fb12.uni-siegen.de/">http://www.cg.fb12.uni-siegen.de/</a>





## Schriftenverzeichnis Prof. Dr.-Ing. Andreas Kolb

1. C. Rezk-Salama, A. Kolb. A vertex program for efficient box-plane intersection, zur Publikation angenommen, Proc. Vision, Modeling & Visualization, 2005
2. A. Kolb, C. Rezk-Salama: Efficient empty space skipping for per-pixel displacement mapping, zur Publikation angenommen, Modeling & Visualization, 2005.
3. R. Strzodka, M. Doggett, A. Kolb: Scientific Simulations on Graphics Hardware, zur Publikation angenommen, Simulation Practice and Theory, 2005
4. A. Kolb: Dynamic Particle Coupling for GPU-based Fluid Simulation, zur Publikation angenommen, 18. Sym. on Simulation (ASIM), 2005
5. S. Todt, C. Rezk-Salama, and A. Kolb. Real-time fusion of range and light field images. SIGGRAPH Poster-Session, 2005
6. C. Bastuck, T.Hambürger, T.Hof, M.Keller, P.Kohlmann, J.Mehnert, S.Nowak, C.Rezk-Salama, A.Kolb: An Open and Extensible Framework for Visualization, Tagungsband der Informatiktag 2005 der Gesellschaft für Informatik
7. A. Kolb, L. Latta, C. Rezk-Salama: Hardware-based Simulation and Collision Detection for Large Particle Systems, Proc. Graphics Hardware, 2004
8. L. Latta, A.Kolb: Homomorphic Factorization of BRDF-based Lighting Computation, ACM-SIGGRAPH, 21:3, pp 509-516, 2002
9. G.Greiner, A.Kolb, A.Riepl: Scattered Data Interpolation Using Data-dependent Optimization Techniques, Graphical Models 64 pp 1-18, 2002
10. A.Kolb, L.John: Volumetric Model Repair for Virtual Reality Applications, Eurographics 2001, ISSN 1017-4656
11. A.Kolb,W.Ülzmann,M.Bühner: Interaktion und Skalierbarkeit im Bereich Telepräsenz, Technischer Bericht, FH Wedel und Lumo Graphics GmbH
12. P.Slusallek, R.Klein, A.Kolb, G.Greiner: An Object-Oriented Approach for Curves and Surfaces, Object-oriented and fixed programming paradigms, Ed: P.Wisskirchen, Springer, pp 33-44, 1996
13. A. Kolb: Optimierungsansätze bei der Interpolation verteilter Daten, Dissertation, Universität Erlangen, 1995
14. G.Greiner, A.Kolb, R.Pfeifle, H.-P.Seidel, M.Encarnacao, R.Klein: A Platform for visualizing curves and surfaces, CAD, pp 559-566, 1995
15. A.Kolb, H.Pottmann, H.-P.Seidel: Fair Surface Reconstruction Using Quadratic Functionals, Eurographics, Vol. 14, pp 469-479, 1995
16. A.Kolb, H.Pottmann, H.-P.Seidel: Surface Reconstruction Based Upon Minimum Norm Networks in Math. Methods for Curves and Surfaces, Vanderbilt University Press, 1995
17. A.Kolb, H.-P.Seidel: Interpolating Scattered Data with C-2 Surfaces, CAD, 27:4, pp 277-282, 1995
18. P.Slusallek, R.Klein, A.Kolb, G.Greiner: An Object-Oriented Framework for Curves and Surfaces with Applications, Curves & Surfaces II, Eds: P.Laurent, A.LeMehaute, L.Schumaker, AK Peters, pp 457-466, 1994
19. P.Slusallek, R.Klein, A.Kolb, G.Greiner: An Object-Oriented Approach to Curves and Surfaces, 4. Eurographics Workshop on Object-Oriented Graphics, pp 29-39, 1994

Bitte vollständig und lückenlos ausfüllen und nach Vertragsabschluss umgehend an die DFG senden!

## Personalfragebogen für Mitarbeiter in DFG-Sachbeihilfen

### 1. Allgemeine Angaben

DFG-Geschäftszeichen	Kennwort des Forschungsvorhabens		
Name, Vorname des(r) Mitarbeiters(in) (ggf. Geburtsname, akadem. Titel)			
Geburtsdatum	Familienstand		
	<input type="checkbox"/> ledig	<input type="checkbox"/> verheiratet	<input type="checkbox"/> verwitwet <input type="checkbox"/> geschieden seit

### 2. Nur ausfüllen bei wissenschaftlichen Mitarbeitern

Studienfächer (Hauptfach bitte unterstreichen)			
Examina	Wann ?	Wo ?	Bei wem ?
Ist die Promotion beabsichtigt?			
<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein			

### 3. Nur ausfüllen bei nichtwissenschaftlichen Mitarbeitern

Prüfung bestanden als	am
Staatliche Verleihung als	am

### 4. Lückenloser beruflicher Werdegang (seit Abschluss des Studiums bzw. der Berufsausbildung, ggf. auf einem bes. Blatt fortführen)

Beschäftigt vom	bis	als	Arbeitgeber	Bitte Geschäftszeichen der DFG-Beihilfe angeben

5. Einstellungsdatum	Beschäftigt als
Konkrete Tätigkeitsdarstellung	



6. Ein **Privat-Arbeitsvertrag** wurde abgeschlossen nach

DFG-Vertragsmuster 41.02 (nur für Angestellte nach BAT-West bzw. Arbeiter nach MTArb-West)  
 DFG-Vertragsmuster 41.021 (nur für Angestellte nach BAT-Ost bzw. Arbeiter nach MTArb-Ost)

für die Zeit  
vom \_\_\_\_\_ bis \_\_\_\_\_ am \_\_\_\_\_  
(ein **unbefristetes** Arbeitsverhältnis darf **nicht** vereinbart werden)

Verg.Gr. <u>BAT</u> BAT-O	Lohngr. <u>MTArb</u> MTArb-O	<input type="checkbox"/> vollbeschäftigt	teilzeitbeschäftigt mit regelmäßiger wöchentlicher Arbeitszeit <input type="checkbox"/> der Hälfte <input type="checkbox"/> _____ Wochenstunden der tarifvertraglich festgelegten Arbeitszeit für Vollbeschäftigte
------------------------------	---------------------------------	--	--

7. Nur bei wissenschaftlichen Hilfskräften mit Abschluss (soweit kein BAT/BAT-O Arbeitsvertrag besteht) ausfüllen!

Ein **Privat-Arbeitsvertrag** nach dem Vertragsmuster des Institutsträgers für wissenschaftliche Hilfskräfte mit Abschluss wurde abgeschlossen für die Zeit

vom _____	bis _____	am _____	Vereinbarte Arbeitszeit _____ Wochen-/Monatsstd.	Vereinbarte Vergütung lt. Hochschulregelung <u>Stundensatz</u> _____ EUR <u>Monatspauschale</u> _____ EUR
-----------	-----------	----------	---	---

8. Nur bei ausdrücklicher Institutsbewilligung (an nur bestimmte privatrechtliche Einrichtungen) ausfüllen!

Es besteht  Es wird abgeschlossen  
ein Arbeitsvertrag mit dem Institutsträger auf der Grundlage

des BAT/BAT-O bzw. MTArb/MTArb-O  
 der für das Institut geltenden Vergütungsregelungen  
(in diesem Fall ist jeder Personalabrechnung eine Aufstellung über die Höhe der tatsächlich gezahlten Vergütung beizufügen)

9. Nur bei Sonderkonto-Abwicklung ausfüllen!

Grundvergütung Verg.Gr. _____ BAT/ BAT-O	Monatslohn Lohngruppe _____ MTArb/ MTArb-O
Lebensaltersstufe _____ EUR	Ortslohnklasse _____ Stufe <sup>2)</sup> _____ EUR
Ortszuschlag <sup>1)</sup> _____ EUR	Sozialzuschlag <sup>1)</sup> _____ EUR
Allgemeine Zulage _____ EUR	Allgemeine Zulage _____ EUR
Zulage nach § 33 BAT(Art der Zulage) _____ EUR	Zuschläge (Art der Zuschläge) _____ EUR
vermögenswirksame Leistungen AG _____ EUR	vermögenswirksame Leistungen AG _____ EUR
<b>Monatsbruttovergütung</b> _____ <b>EUR</b>	<b>Monatsbruttolohn</b> _____ <b>EUR</b>

<sup>1)</sup> Als Anlage ist die „Erklärung zum Ortszuschlag/Sozialzuschlag“ beizufügen.  
<sup>2)</sup> Der Beginn der Dienstzeit nach § 24 MTArb ist festgesetzt auf den \_\_\_\_\_.

Sofern der Mitarbeiter vor der Einstellung als BAT-Angestellter im öffentlichen Dienst beschäftigt war:  
Eingruppiert in Vergütungsgruppe \_\_\_\_\_ BAT/ BAT-O Grundvergütung nach Lebensaltersstufe \_\_\_\_\_.

10. Ich versichere, dass die vorstehenden Angaben vollständig und richtig sind. Gleichzeitig verpflichte ich mich, Änderungen gegenüber den Angaben in diesem Personalfragebogen **sofort schriftlich** der Deutschen Forschungsgemeinschaft mitzuteilen.

\_\_\_\_\_  
Ort, Datum

\_\_\_\_\_  
Unterschrift des Beihilfeempfängers

**Prüfvermerk der DFG**

1. Die Angaben wurden geprüft
2. Zur Nebenakte

\_\_\_\_\_  
Datum, Namenszeichen Sachbearbeiter I 2

## 3D-Camera of High 3D-Frame Rate, Depth-Resolution and Background Light Elimination Based on Improved PMD (Photonic Mixer Device)-Technologies

H. Kraft, J. Frey, T. Moeller, M. Albrecht, M. Grothof, B. Schink, H. Hess, Universität Siegen;  
B. Buxbaum, PMDTechnologies GmbH Siegen

Universität Siegen  
Institut für Nachrichtenverarbeitung (INV)  
Hölderlinstraße 3  
57068 Siegen

PMDTechnologies GmbH  
Am Eichenhang 50  
57076 Siegen

### ABSTRACT AND INTRODUCTION

The knowledge of three-dimensional data is essential for many control and navigation applications. Especially in the industrial and automotive environment a fast and reliable acquisition of 3D data has become a main requirement for future developments.

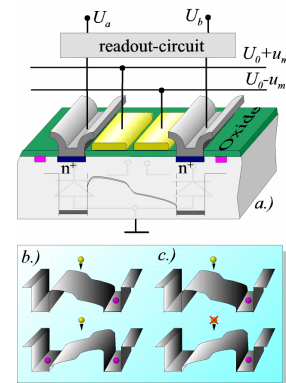
This contribution describes novel 3D camera modules used in Time-of-Flight measurement systems for 3D imaging applications. The key components are array and line sensors which can measure the distance to the target pixelwise in parallel, i.e. without scanning. Therefore these cameras have the advantages of fast imaging and high lateral resolution combined with the depth information of the captured scene. The sensors consist of smart pixels, called the Photonic Mixer Device (PMD) which enables fast optical sensing and demodulation of incoherent light signals in one component [1][2].

To realize a Photonic Mixer Device there are different techniques currently under investigation. Sensors are conceivable working with different types of electromagnetic waves, e.g. light, microwaves or ultrasound. In this paper two types of optical 3D-cameras with different PMDs are described. Each camera consists of a sensor chip, a modulated optical transmitter, control and processing electronics and software package. One camera is realized with standard CMOS technology based on Photogate (PG) PMD. The other sensor uses a different type of PMD, called Metal-Semiconductor-Metal (MSM) PMD.

Beginning from the description of both PMD types and their characteristics the system concept is shown. Based on realized cameras the sensor architectures and system environment are described. Finally measurements are presented to show the performance of the cameras in terms of accuracy, resolution and suppression of background illumination.

### THE PHOTOGATE PMD (PG-PMD)

This section describes the principle of a simplified Photogate PMD realized in CMOS technology. The PG-PMD element is a smart pixel device because the mixing process of the electric and optical signal takes place in the device. **Figure 1** shows an illustration of a single pixel PG-PMD sensor element. It is a five-terminal device with an optical input window, i.e. two transparent modulation electrodes in the middle of the illustration. These photogates are isolated from the substrate by a thin oxide layer. The gates are conductive and transparent for the received light. On the left and the right there are readout diodes which are connected to the pixel readout circuitry. In a PG-PMD the charges do not only move in one direction, they move to the left or to the right depending on the reference signal applied to the modulation gates. The potential distribution in the surface region is influenced by these push-pull voltages leading to a "dynamic seesaw" for the generated charges. If the incident light is constant and the modulation is a rectangular signal with a duty cycle of 50% the generated charge carriers within a modulation period move to the left and to the right equally. At the end of such a modulation process the output voltage at the readout nodes are the same which is shown in **Figure 1 b)**. If both signals are, e.g. rectangular signals and there is no phase delay between them, all charges will be moved to one of both readout diodes which is shown in **Figure 1 c)**. The modulation of the light intensity and its phase delay to the electrical reference signal results in a difference between the two output voltages. Obviously the difference of both output nodes is directly dependent on the phase delay between light and pixel modulation and represents the correlation function. This data can be used to calculate the distance from a light-reflecting object to the sensor as described in a later section.



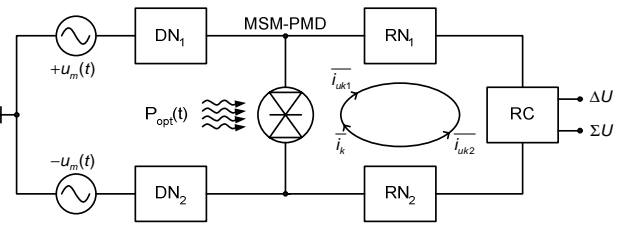
**Figure 1: Operation principle of PG-PMD**

### THE METAL SEMICONDUCTOR METAL PMD (MSM-PMD)

The MSM-PMD that is used in one of our systems is based on photodiode structures using Schottky-barrier structures as shown in a later section. The bandwidth of these diodes is experimentally proven up to several GHz, depending on the material, the barrier realization, and so on. This fact offers a very fine resolution in a ranging system based on such a MSM-PMD reception principle. **Figure 2** shows the basic structure of such a MSM-PMD receiver. The electrical reference signal is used for modulation of the optical transmitter and for demodulation of the

reflected light signal  $P_{opt}(t)$ . For demodulation the reference signal is changed into push pull signals  $+u_m(t)$  and  $-u_m(t)$ . The AC-part of these signals is applied to the MSM-diode via the decoupling networks  $DN_{1,2}$ .

The readout networks  $RN_{1,2}$  on the right part suppress these RF-signals. Only that part of the signal which correlates to the modulation voltage, is *slow* enough to pass these networks. The readout circuit  $RC$  analyses the signal and delivers the results. The main feature of this circuit is that the mixing of the generated charge carriers takes place directly inside the light sensitive area of the diode. The closed circuit on the right side of the structure is the key to an improvement of the SBI (Suppression of Background Illumination)-functionality [3]. Any uncorrelated photocurrents  $i_{uk1,2}$  are – on the average – equally distributed onto both arms. Therefore these uncorrelated signals compensate each other. This effect only depends on the symmetry of the structure and is attained without any additional components. The correlated part of the averaged photocurrent  $i_k$  has a flow-direction depending on modulation phase. This results in different voltages in the readout networks after a certain integration time. These voltages are the values that are analyzed by the readout circuit to deliver the measurement result.

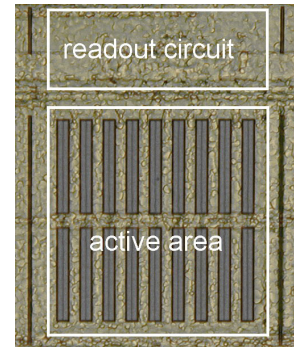


**Figure 2: Basic structure of a SM-PMD-device based on a MSM-diode. The MSM-diode as central mixing unit is displayed with the symbol in the middle of the picture**

### SENSOR CONCEPT AND CAMERA DESCRIPTION

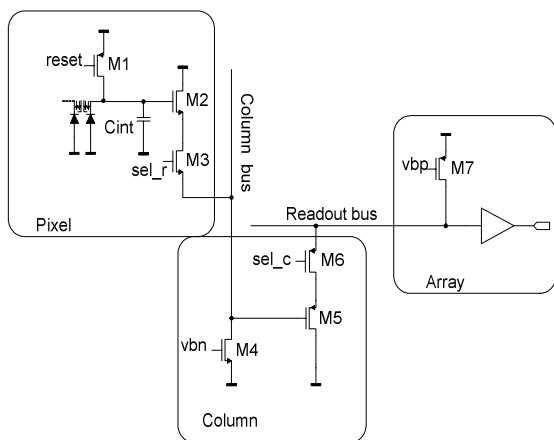
#### Smart optical sensor array based on PG-PMD

Our development in the past has led to a Photogate-pixel with scalable pixel pitch without a loss in the mixing efficiency. The active pixel size can be modified based on application requirements from  $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$  up to  $300\mu\text{m} \times 300\mu\text{m}$ . Other application specific sizes and aspect ratios are also conceivable. This feature is based on a new kind of pixel layout. The structure of readout channels and modulation gates are independent of the pixel dimension and optimized for matrix structures. Photogate pixels with large dimensions can therefore offer almost the same performance as small designs. The channel width has been optimized for higher bandwidth (up to several 100 MHz) to increase pixel performance and accuracy. **Figure 3** shows the PG-structure of the  $16 \times 16$  matrix in the described 3D camera. The active area consists of 2 rows with 9 fingers each and has a typical channel width of  $10\mu\text{m}$ . Single pixel and line pixel sensors can reach an optical fill factor up to 60% (designed in a typical  $0.6\mu\text{m}$  process). A smaller process can offer a fill factor of approx. 75% in the optical active area.



**Figure 3: Photogate structure**

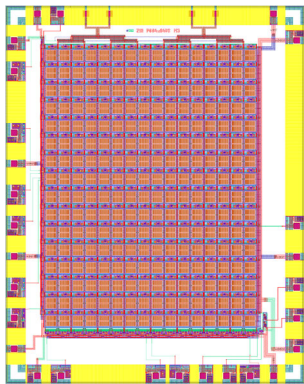
Even if a PMD pixel looks a little exotic in comparison to a 2D active pixel, a PG-PMD sensor is build in a standard process. The sensor array was integrated in a  $0.6\mu\text{m}$  triple metal n-well CMOS process. A  $16 \times 16$  array with a pixel pitch of  $210\mu\text{m} \times 155\mu\text{m}$  was developed. Photogate pixels normally have two output signals and so the read out circuitry consists of two separate branches. One of them is shown in **Figure 4**. A simple PG-pixel has a reset switch (M1), a pixel select switch (M3) and a read out buffer (M2) working as a source follower. All pixel source followers share one load transistor (M4) at the bottom of each column. The column



**Figure 4: Simplified schematic of the PG-pixel and readout circuitry in the PMD array**

circuitry consists of a PMOS source follower (M5) with the column select switch (M6). At the end of the row a load transistor (M7) and the output stage are placed. The output signal is converted to digital values off chip. In further designs the analog-digital converter could be integrated on the sensor chip achieving higher frame rates with lower system costs. All bias currents are proper calculated to realize a maximum settling time of 150ns. In combination with our actual camera system a pixel read out speed of 2MSamples/s resulting in a total read out time of  $128\mu\text{s}$  is realized. Standard CMOS active pixel sensors need a correlated double sampling for each column and a double delta sampling for the whole array. With these techniques fixed pattern noise can be reduced. Our PG-PMD sensor doesn't need these additional circuits. For calculating the 3D data several integration cycles respectively their output values are needed so that a kind of double or even multi sampling is done, therefore fixed pattern noise is eliminated. Using the absolute values of both integration voltages grayscale data can be calculated as additional information of the observed scene. [1]

High resistance of the modulation lines and the capacity of the modulation gates of each PMD may result in a phase shift of modulation and so in a distance offset variation from pixel to pixel. In comparison to previous designs the modulation lines are more symmetrical and they have a lower resistance to avoid this error. The root-like modulation line design can be seen in top of the chip layout in **Figure 5**. The digital control circuit consists of two units which are the row and the column control circuit. Standard logic blocks are used achieving higher read out speed than 2MHz. **Figure 6** shows the camera module with active illumination, optical components and periphery.



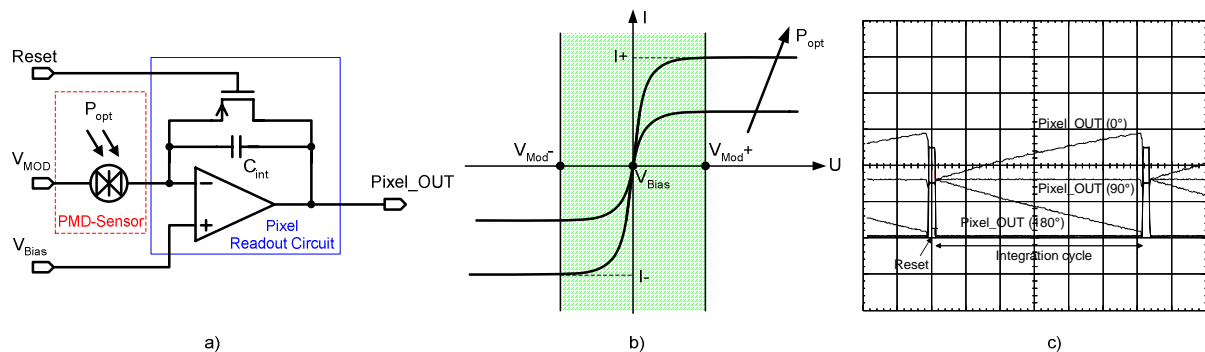
**Figure 5: Layout of PG-PMD chip**



**Figure 6: 3D camera module on tripod**

### Smart Optical sensor line based on MSM-PMD

The usage of MSM-PMD has enormous advantages for applications with disturbing illumination, i.e. uncorrelated background light, without adding additional circuitry for SBI. Furthermore these structures are proven with modulation frequencies up to several GHz allowing a very fine resolution of the 3D information [3]. The following figure illustrates the principle of a smart optical pixel with MSM-PMD in our 3D-camera. In contrast to the description given above a technique of single sided modulation and readout is used. Using this method a high on-chip integration level can be achieved to realize multipixel sensors without additional off-chip filtering.

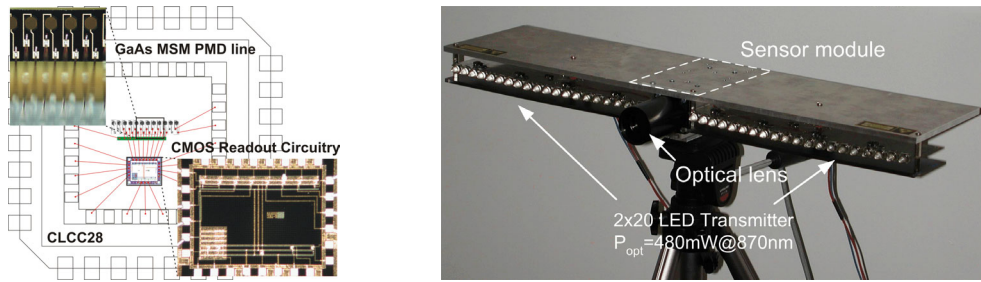


**Figure 7: a) Pixel schematic b) typical IV-characteristics of a MSM structure: The switching of the operation points provides the mixing and the SBI functionality c) Integration examples with different phases (0°, 90°, 180°)**

For first applications a line sensor of 8 MSM-PMD elements has been defined. Each pixel consists of a MSM-PMD sensor and a specific readout circuit which is based on an active op-amp integrator with reset. This integrator ensures a constant voltage at the readout side of the PMD element (approx.  $V_{Bias}$ ). All pixels use the same modulation source ( $V_{MOD}$ ) and have a global reset. After a reset the correlation of the electrical modulation signal and the incident light reflected by the 3D scene ( $P_{OPT}$ ) is analyzed by integration of the photocurrent as shown above.

The correlation result due to the phase shift between these signals is indicated by a voltage (Pixel\_OUT). The readout of the sensor line is done sequentially at the end of the integration cycle. The output voltage of each pixel is processed by an external signal processing unit and is used to calculate the distance from the sensor to the target for each pixel separately as described in the next section. The realization of such a 1x8 line MSM-PMD sensor chip is shown in **Figure 8**.

To combine state-of-the-art MSM structures with application specific CMOS circuitry a first multichip approach has been realized. The MSM-PMD sensor line itself consists of 8 interdigitated Schottky diodes realized with gallium arsenide MSM structures. The outputs of these diodes are connected to a silicon die with an 8 stage readout circuitry using a standard wire bonding technology. Using integrable MSM devices, e.g. silicon based Schottky structures high dense single chip solutions are possible and currently under investigation.



**Figure 8: Left: MSM sensor line with CMOS readout circuitry in a multichip approach. Each MSM structure has a diameter of 150µm, the pixel pitch is 250µm. Right: 3D camera module with active illumination on a tripod.**

**Description of camera system environment**

In principle the system environments for both cameras are the same. It can be divided into four main parts. The first part is the system board consisting of a power supply, a microcontroller, an analog-to-digital converter and a programmable logic device. A PMD-chip (PG or MSM) and its required peripheral devices are comprised in the second part, the so called “frontend”.

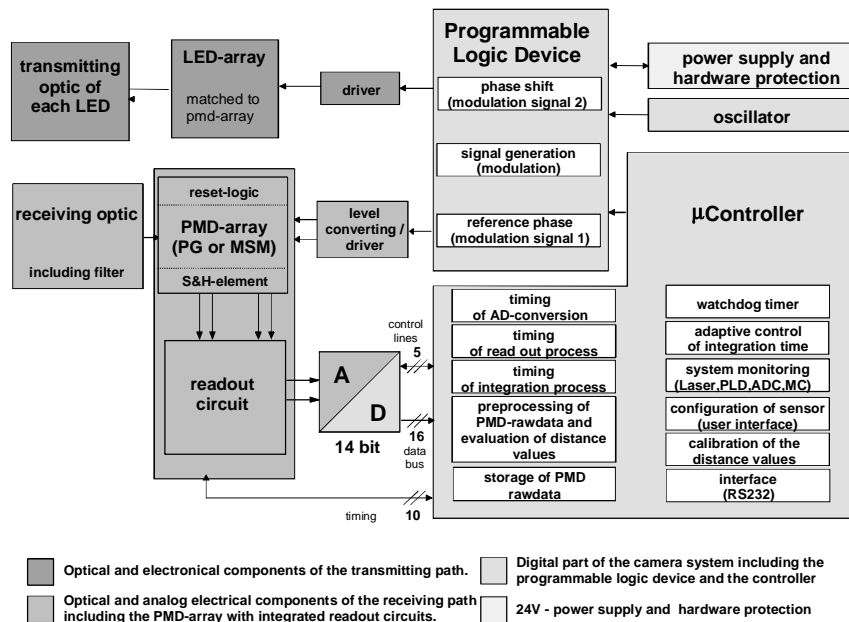
To generate the optical signal a third part is needed. The light source mostly consists of an LED-array and an adapted power supply. The last part that is needed is the case of the camera including the optical components (lens, optical filter, ...). **Figure 9** shows an overview of these parts and their function in the camera system.

The function of the programmable logic device is to generate two rectangular signals with the same frequency and duty cycle. The first signal, whose phase can be shifted, is converted into an optical one via the LED array. This optical signal is sent to the objects and the reflected light is received by the PMD-array (PG or MSM).

The second signal of the programmable logic device is directly connected to the PMD-array. The main function of the PMD-array is to correlate the received optical signals with the electrical reference signal and send the results via the analog-to-digital converter to the microcontroller. The microcontroller collects the results of four different measurements. The measurements only differ in the phase (0°, 90°, 180°, 270°) between electrical and optical signal. The results are four equidistant points of the correlation function of the received optical signal in one PMD-pixel and the electrical reference signal. With these points it is possible to determine the offset, the amplitude and the phase delay of the correlation function. The phase delay itself is proportional to the distance which the light has to cover on its way to the object and back, therefore the distance matrix can be calculated.

The communication between the camera system and its environment is based on standard serial interface. The camera system can be connected to industrial control units or a PC via this interface. The incoming data may be used to control a robotic unit, for monitoring purposes or just for visualization of the captured 3D image. Different kinds of visualization are already implemented in C++ and Matlab software.

In the current version of this camera the whole timing control and the readout of the measurement results are implemented in the microcontroller. In the next version which is currently under development the programmable logic device will take over these functions. Additionally the microcontroller will be faster and therefore frame rates like video frame rates or higher will be possible in the next generation of high resolution 3D camera.



**Figure 9: Basic structure of a MSM-PMD- or PG-PMD-camera system**

- Optical and electronic components of the transmitting path.
- Optical and analog electrical components of the receiving path including the PMD-array with integrated readout circuits.
- Digital part of the camera system including the programmable logic device and the controller
- 24V - power supply and hardware protection



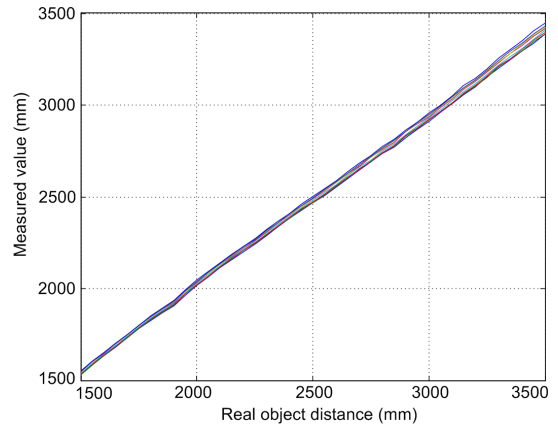
## MEASUREMENT RESULTS

### 16x16 PG-PMD 3D camera

**Figure 10** shows an exemplary measurement of 8 arbitrary pixels within the given matrix in the 3D PG-PMD camera. The target was a plain surface of white paper, the integration time was kept constant. The modulation frequency was 20 MHz which allows a range of unambiguously of 7.5m [1]. The standard deviations of the measured values were in the range from approx. 12mm (@1500mm) to approx. 35mm (@3500mm). Of course, the accuracy of the measurement depends on several parameters shown below. For example, the signal to noise ratio is affected by many things like optical power, the distance to the target, background light, system noise and so on.

$$\Delta L = \frac{\lambda_{RF}}{4\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{N}} \cdot \frac{\sqrt{2+K^2}}{K \cdot SNR}$$

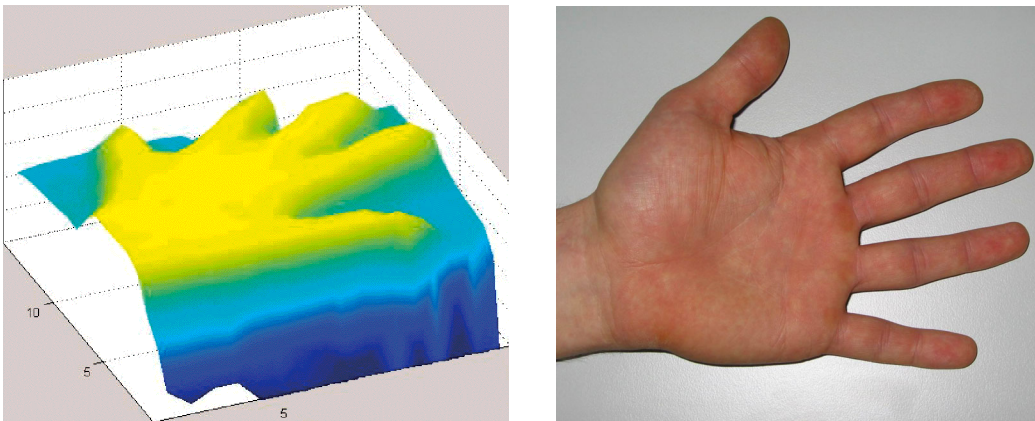
$\Delta L$	distance resolution in standard deviation
$N$	number of measurements
$K$	modulation contrast
$SNR$	signal to noise ratio
$\lambda_{RF}$	modulation wavelength



**Figure 10: Measurement (mean value) of 8 arbitrary pixels within the PG-PMD camera. The integration time was constant (5ms). Target was a plain surface of white paper.**

As described our camera has a total number of 256 pixels for parallel 3D measurement without scanning. In contrast to other low resolution 3D ranging systems, e.g. radar, this camera is already suitable for many applications in industrial and automotive field. In addition to the 3D information our camera has an additional benefit with the acquisition of 2D grayscale information for enhanced image processing. An exemplary measurement of the 16x16 camera is given in **Figure 11** on the left side. It shows a 3D image of a human hand in front of a plain surface. The measured distance is visualized in different hues. Additionally the 3D image has been rotated and smoothed for a better three dimensional perception. For comparison a high resolution 2D image is given on the right side in **Figure 11**.

With our sensor array such 3D images can be taken within a few microseconds which allows the acquisition of a moving scene in realtime.



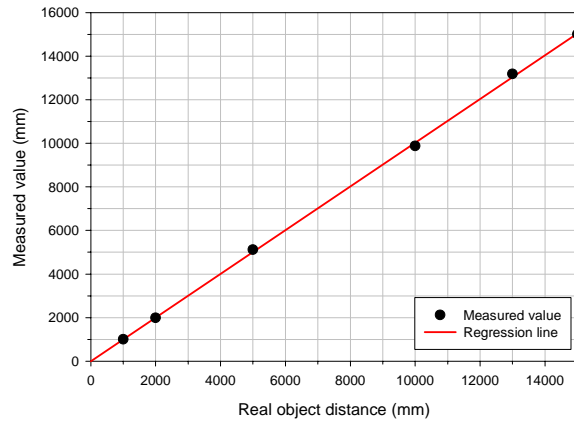
**Figure 11: Left: 3D image of a human hand taken with 3D PG camera. 3D Image has been rotated and smoothed to visualize the depth information. Right: A high resolution 2D image for comparison**

### 1x8 MSM-PMD line sensor camera

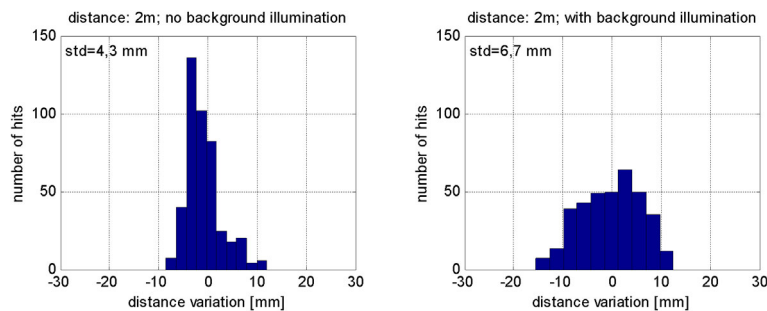
**Figure 12** shows a measurement done with an arbitrary pixel in the described MSM line sensor camera. The used modulation frequency was 10 MHz which allows a range of unambiguously of 15m. The target was a plain surface of white paper in different distances. The standard deviations under these conditions were in the range from approx. 5mm (@1m) to 70mm (@15m).

To show the influence of uncorrelated background light a measurement is given in **Figure 13**. Despite of background light, a measurement can be done with slightly increased standard deviation. It has to be kept in mind that this feature is achieved *without any additional* circuitry. The suppression of uncorrelated signals is provided only by the sensor and the function principle as described above.

The suppression of background illumination has been proven up to a ratio of 1000 in laboratory environment. These measurements were done with a modulated laser source whereas the DC background light was generated with a cold-light lamp (3400K). The MSM pixel has been exposed with the modulated laser light (20nW @635nm) and the background illumination directly. In this configuration phase measurements were possible even if the optical power of the background light was 1000 times higher than the active illumination. The standard deviation of the measured phase was approx. 11° at highest background level. For example, with these conditions the measured distance of an object in the range of 10m has a standard deviation of approx. 0.45m (modulation frequency 10MHz).



**Figure 12: Measurement (mean value) of an arbitrary pixel in the range of 1 to 15m. The integration time was 10ms. Target was a plain surface of white paper.**



**Figure 13: Measurements with a plain surface of white paper in a distance of 2m. Left: only active illumination on target ( $160\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ). Right: Same measurement conditions but with additional background illumination ( $720\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ). The integration time was 20ms**

## CONCLUSION AND PERSPECTIVES

In this paper two types of 3D cameras based on different PMD principles are described. The use of PG-PMD devices allows a high integration level in a standard CMOS process. The advantages are the low production costs and the possibility to integrate additional on chip system components (SOC). In addition to the 3D data the grayscale image of the scene can be detected for an enhanced image processing. The advantage of the MSM-PMD is the high modulation frequency and the inherent suppression of background illumination without additional circuitry.

Because of the mentioned features both concepts are suitable for a wide field of applications, e.g. automotive, safety, industrial control and navigation, robotics and virtual reality. New generations of 3D sensors are currently under development. A PG-camera with resolution of 160x120 will be available this year as well as a MSM-camera with the resolution of 16x4.

## ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to thank the INV, PMDTechnologies, S-Tec and ZESS staff for technical support, as well as partly financial support from BMBF.

## REFERENCES

1. Ringbeck, Thorsten; Albrecht, Martin; Frey, Jochen; Grothof Markus; Heß, Holger; Kraft, Holger; Möller Tobias; Mosen Joachim; Schink, Benja, „Time-of-Flight 3D-camera for autonomous navigation and industrial automation“ Sensor 2003, Nürnberg
2. M. Grothof, R. Schwarte, B. Buxbaum, T. Ringbeck, J. Frey, „Product monitoring with MSM-PMD-array“, Kongreßband OPTO 2002, AMA Fachverband für Sensorik, Erfurt 2002.
3. B. Buxbaum, R. Schwarte, T. Ringbeck, M. Grothof, X. Luan, “MSM-PMD as correlation receiver in a new 3D-ranging system”; SPIE – Remote Sensing, Laser Radar Techniques: “Ranging and Atmospheric Lidar”, Toulouse 2001.

[» HP Home](#)[» Products & Services](#)[» Support & Drivers](#)[» Solutions](#)[» How to Buy](#)[» Contact HP](#)Buy online or call **800.888.9909**

Search:

[SMB Store](#)[Supplies & Accessories](#)[HP US](#)[» Store home](#) | [» Computing](#) | [» Printing & Digital imaging](#) | [» Supplies & Accessories](#)

## Shopping cart

**HP recommends Microsoft®  
Windows® XP Professional**[» Small & Medium  
Business Online Store](#)

Please review your order below. To change the quantity of an item, enter a new number in the quantity box, then click recalculate to adjust the total. To remove an item, click the remove button to the right of the item.

**Estimated Ship Date: 9/28/2005<sup>3</sup>**[🔒 Online security information](#)**Recalculate >>**

Item	Unit cost	Quantity	Total price	
<b>-Configurable-HP ProLiant DL585 (PC3200) - Rack Server</b> HP ProLiant DL585 rack server Two AMD® 852 Opteron™ 2.6GHz/1MB processors 8GB REG PC3200 4/(2X1024) Integrated Smart Array 5i Plus Controller with Battery Backed Write Cache HP 72.8GB Pluggable Ultra320 SCSI 15,000 rpm (1") Universal Hard Drive Dual Port HP NC7782 PCI-X Gbit (embedded) Dual 870W hot pluggable power supply 1.44MB Floppy Disk Drive CD-ROM drive 24X carbon Warranty - 3 year next business day onsite	\$16,172.00	<b>Update &gt;&gt;</b>	\$16,172.00	<b>Remove &gt;&gt;</b> <b>Reconfigure &gt;&gt;</b> <b>Estimated Ship Date 9/28/2005<sup>3</sup></b>
HP Care Pack, 4 Years, Next Day, Hardware, ProLiant DL580	\$695.00	<b>Update &gt;&gt;</b>	\$695.00	<b>Remove &gt;&gt;</b> <b>In stock: Usually ships in 24 hours<sup>3</sup></b>
<b>Subtotal:</b>			<b>\$16,867.00<sup>1</sup></b>	
<b>Business lease cost: (48 months) » Apply online</b>			<b>\$447.31<sup>2</sup></b>	<b>Estimate Tax &amp; Shipping &gt;&gt;</b>

I am buying through a HP Influencer Partner.

**Recalculate >>**

<sup>1</sup> HP is not liable for pricing errors. If you place an order for a product that was incorrectly priced, we will cancel your order and credit you for any charges. In the event that we inadvertently ship an order based on a pricing error, we will issue a revised invoice to you for the correct price and contact you to obtain your authorization for the additional charge, or assist you with return of the product.

<sup>2</sup> Lease products available through Hewlett-Packard Financial Services Company or one of its affiliates to qualified commercial customers in the U.S., and is subject to credit approval and execution of standard HP Financial Services documentation. The equipment lease price is based on a 48-month lease term with a Fair Market Value (FMV) purchase option at end of lease term. Offer valid on all transactions greater than \$349. Other fees and restrictions may apply. HP Financial Services reserves the right to change or cancel this program at any time without notice. © Hewlett-Packard Financial Services Company 2004. All Rights Reserved. Reproduction, adaptation, or translation without prior written permission is prohibited, except as allowed under the copyright laws.

<sup>3</sup> HP is not responsible for delays outside of our immediate control, including delays related to order processing or unexpected increase in demand. Typically only orders paid for by credit card receive credit approval on the same day the order is placed. Orders delayed due to order processing will default to an Estimated Ship Date 30 days from the date credit is processed and the order is released. Estimated Ship Dates are based on any known extended lead times.



<sup>4</sup>Tax shown is an estimate - precise tax calculation will take place upon order processing.

Shipping carrier may change without notice. Every effort will be made to use the selected carrier. Possible reasons for a carrier change include: weight or dimension limitations, service area limitations and severe weather conditions. For additional details see the [shipping information page](#).

# Intel's numbering is not a measurement of higher performance

 [Printable version](#)

[Privacy statement](#)

[Using this site means you accept its terms](#)

[Terms and conditions of sale and service](#)

[Feedback to webmaster](#)

© 2005 Hewlett-Packard Development Company, L.P.

[» HP Home](#)[» Products & Services](#)[» Support & Drivers](#)[» Solutions](#)[» How to Buy](#)[» Contact HP](#)Buy online or call **800.888.9909**

Search:

[SMB Store](#)[Supplies & Accessories](#)[HP US](#)[» Store home](#) | [» Computing](#) | [» Printing & Digital imaging](#) | [» Supplies & Accessories](#)

## Shopping cart

**HP recommends Microsoft®  
Windows® XP Professional**[» Small & Medium  
Business Online Store](#)

Please review your order below. To change the quantity of an item, enter a new number in the quantity box, then click recalculate to adjust the total. To remove an item, click the remove button to the right of the item.

**Estimated Ship Date: 9/21/2005<sup>3</sup>**[🔒 Online security information](#)**Recalculate >>**

Item	Unit cost	Quantity	Total price	
<b>HP ProLiant DL580 G3 3.00GHz Rack Server</b> HP ProLiant DL580 G3 3.00GHz/8M Rack Server Intel® Xeon™ 3.00GHz/8M Processor Intel® Xeon™ 3.00GHz/8M Processor 1st memory board 2GB REG PC2-3200 (2x1024MB) memory Ultra320 Smart Array 6i Controller NC7782 Dual Port PCI-X Gigabit server adapter (embedded) Ejectable Slimline 8X/24X DVD-ROM Drive Dual 910/1300W power supplies Integrated Lights Out Remote Management Warranty - 3 year next business day onsite <b>This product is pre-configured. Additional options ship separately</b>	\$11,699.00	<b>Update &gt;&gt;</b>	\$11,699.00	<b>Remove &gt;&gt;</b> <b>Reconfigure &gt;&gt;</b> <b>Estimated Ship Date 9/21/2005<sup>3</sup></b>
4GB REG PC2-3200 (2X2GB) memory	\$5,539.00	<b>Update &gt;&gt;</b>	\$5,539.00	<b>Remove &gt;&gt;</b> <b>Estimated Ship Date 9/9/2005<sup>3</sup></b>
HP 72.8GB Pluggable Ultra320 SCSI 15,000 rpm (1") Universal Hard Drive	\$529.00	<b>Update &gt;&gt;</b>	\$529.00	<b>Remove &gt;&gt;</b> <b>Estimated Ship Date 9/9/2005<sup>3</sup></b>
<b>Subtotal:</b>			<b>\$17,767.00<sup>1</sup></b>	
<b>Business lease cost: (48 months) » Apply online</b>			<b>\$471.18<sup>2</sup></b>	<b>Estimate Tax &amp; Shipping &gt;&gt;</b>

I am buying through a HP Influencer Partner.

**Recalculate >>**

<sup>1</sup> HP is not liable for pricing errors. If you place an order for a product that was incorrectly priced, we will cancel your order and credit you for any charges. In the event that we inadvertently ship an order based on a pricing error, we will issue a revised invoice to you for the correct price and contact you to obtain your authorization for the additional charge, or assist you with return of the product.

<sup>2</sup> Lease products available through Hewlett-Packard Financial Services Company or one of its affiliates to qualified commercial customers in the U.S., and is subject to credit approval and execution of standard HP Financial Services documentation. The equipment lease price is based on a 48-month lease term with a Fair Market Value (FMV) purchase option at end of lease term. Offer valid on all transactions greater than \$349. Other fees and restrictions may apply. HP Financial Services reserves the right to change or cancel this program at any time without notice. © Hewlett-Packard Financial Services Company 2004. All Rights Reserved. Reproduction, adaptation, or translation without prior written permission is prohibited, except as allowed under the copyright laws.

<sup>3</sup> HP is not responsible for delays outside of our immediate control, including delays related to order processing or unexpected increase in demand. Typically only orders paid for by credit card receive credit approval on the same day the order is placed. Orders delayed due to order processing will default to an Estimated Ship Date 30 days from the date credit is processed and the order is released. Estimated Ship Dates are based on any known extended lead times.

<sup>4</sup>Tax shown is an estimate - precise tax calculation will take place upon order processing.

Shipping carrier may change without notice. Every effort will be made to use the selected carrier. Possible reasons for a carrier change include: weight or dimension limitations, service area limitations and severe weather conditions. For additional details see the [shipping information page](#).

# Intel's numbering is not a measurement of higher performance

 [Printable version](#)

[Privacy statement](#)

[Using this site means you accept its terms](#)

[Terms and conditions of sale and service](#)

[Feedback to webmaster](#)

© 2005 Hewlett-Packard Development Company, L.P.