

## Antragspaket *Dynamisches 3D Sehen*

Prof. Dr.-Ing.  
Andreas Kolb

Lehrstuhl für  
Computergraphik und  
Multimediasysteme

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 Antrag auf Gewährung einer Sachbeihilfe (Präambel des Paketes)</b>	<b>1</b>
1.1 Beteiligte Institutionen . . . . .	1
1.2 Antragsteller . . . . .	2
<b>2 Vorhabensübersicht</b>	<b>3</b>
2.1 Arbeitsgebiete der Antragsteller und ihrer Arbeitsgruppen . . . . .	3
2.2 Gesamtdauer . . . . .	3
2.3 Antragszeitraum . . . . .	3
2.4 Gewünschter Beginn . . . . .	3
2.5 Zusammenfassende Darstellung des Paketes . . . . .	4
2.6 Dynamisches 3D Sehen . . . . .	4
2.6.1 Anwendungspotentiale des Dynamischen 3D Sehens . . . . .	4
2.6.2 Bisherige Ansätze des 3D Sehens . . . . .	5
2.6.3 Das Photonic Mixing Device (PMD) . . . . .	8
2.7 Ziele des Antragspaketes . . . . .	11
2.7.1 Wissenschaftliche Ziele und Vernetzung der Einzelanträge . . . . .	11
2.7.2 Einzel-Bestandteile des Pakets und adressierte Problemkreise . . . . .	13
2.8 Zusammenfassungen der Einzelvorhaben . . . . .	14
2.8.1 2D/3D Multisensorentwicklung (MultiCam) . . . . .	14
2.8.2 2D/3D-Sensorsimulation (PMDSim) . . . . .	15
2.8.3 2D/3D Datenverarbeitung und -fusion auf Basis der PMD-Technologie (2D3DProc) . . . . .	15
2.8.4 3D-Poseschätzung und 3D-Mapping mittels PMD-Kamera (3DPoseMap) . . . . .	16
2.8.5 Echtzeit-Akquisition bildbasierter 3D-Modelle zur Objekterkennung (PMDLumi) . . . . .	16
2.8.6 3D Bilderfassung im Terahertzfrequenzbereich basierend auf elektro-optischer Detektion (3DTHz) . . . . .	17
2.9 Bezüge . . . . .	18
2.9.1 Die PMD-Technologie als Innovation . . . . .	18
2.9.2 Weitere Forschungsanträge zum Thema PMD . . . . .	18

**3 Unterschriften**

## 1 Antrag auf Gewährung einer Sachbeihilfe (Präambel des Paketes)

Sechs Neuanträge als zusammenhängendes Antragspaket

### 1.1 Beteiligte Institutionen

Das vorliegende Antragspaket wird von drei Forschungsinstitutionen getragen, wobei das Zentrum für Sensorsysteme der Universität Siegen (ZESS) die Koordination der Antragspakete übernimmt:

 Zentrum für Sensorsysteme <b>(ZESS)</b> Universität Siegen	 Multimediale Systeme zur Informationsverarbeitung <b>(MIP)</b> Institut für Informatik Christian-Albrechts- Universität zu Kiel	 Ultrakurzzeitspektroskopie und Terahertz-Physik Physikalisches Institut <b>(PI)</b> J.W.-Goethe-Universität Frankfurt
---	---	---

Das *Zentrum für Sensorsysteme (ZESS)* ist eine zentrale wissenschaftliche Forschungseinrichtung der Universität Siegen und hat den Schwerpunkt Multidimensionale Sensorik / Bildgebende Systeme. Dieser Forschungsschwerpunkt wird von der Universität gezielt durch Neuberufungen und vom Ministerium für Innovation, Wissenschaft, Forschung und Technik (MIWFT) des Landes Nordrhein-Westfalen durch spezielle, den Universitäten für den Aufbau von Forschungsschwerpunkten zugewiesene Zielvereinbarungsmittel unterstützt.

Die Antragsteller aus dem ZESS (siehe Abschnitt 1.2) beteiligen sich am *International Post-graduate Programme (IPP) Multi Sensorics* ([www.multisensorics.de/phd/](http://www.multisensorics.de/phd/)) der Universität Siegen. Derzeit werden im IPP insgesamt fünf Dissertationen auf dem Gebiet der PMD-Technologie, insbesondere in der 2D/3D-Kameraentwicklung, der PMD-Simulation und der 2D/3D-Datenverarbeitung von den Antragstellern aus dem ZESS betreut.

Die Arbeitsgruppe *Multimediale Systeme zur Informationsverarbeitung (MIP)* am Institut für Informatik der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel arbeitet seit Jahren im Bereich Computervision, insbesondere Stereovision. Die Arbeitsgruppe ist international sehr gut ausgewiesen und ist Kooperationspartner in einer Reihe von nationalen und europäischen Forschungsprojekten.

Die Arbeitsgruppe *Ultrakurzzeitspektroskopie und Terahertz-Physik* am Physikalischen Institut (PI) der Johann Wolfgang Goethe-Universität in Frankfurt a.M. beschäftigt sich seit Jahren mit der THz-Technologie<sup>1</sup> und der zeitaufgelösten Laserspektroskopie von Festkörpern.

<sup>1</sup>der THz-Bereich deckt Frequenzen von 300 GHz bis 10 THz ab

Die Arbeitsgruppe ist eine der führenden THz Gruppen, insbesondere im Themenbereich continuous wave (cw) THz Systeme, und ist vielfältig in nationale und internationale Forschungsprojekte integriert, u.A. auch als Koordinator und Sprecher von ESA, EU und DFG Vorhaben.

## 1.2 Antragsteller

<b>Andreas Kolb, Dr.-Ing. (ZESS)</b> Universitätsprofessor, Paket-Koordinator Zentrum für Sensorsysteme und Lehrstuhl für Computergraphik und Multimediasysteme <a href="mailto:kolb@zess.uni-siegen.de">kolb@zess.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	<b>Otmar Loffeld, Dr.-Ing. habil. (ZESS)</b> Universitätsprofessor, stv. Paket-Koordinator Projektbereichsleiter Zentrum für Sensorsysteme, PB 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
<b>Peter Haring Bolívar, Prof. Dr.-Ing. (ZESS)</b> Universitätsprofessor Zentrum für Sensorsysteme und Lehrstuhl für Höchstfrequenztechnik und Quantenelektronik <a href="mailto:haring@zess.uni-siegen.de">haring@zess.uni-siegen.de</a> <a href="http://www.zess.uni-siegen.de">www.zess.uni-siegen.de</a> <a href="http://www.hqe.fb12.uni-siegen.de">www.hqe.fb12.uni-siegen.de</a> Tel.: 0271 / 740 2157	<b>Reinhard Koch, Prof. Dr.-Ing. (MIP)</b> Universitätsprofessor Arbeitsgruppe Multimediale Systeme zur Informationsverarbeitung, Institut für Informatik, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel <a href="mailto:rk@informatik.uni-kiel.de">rk@informatik.uni-kiel.de</a> <a href="http://www.mip.informatik.uni-kiel.de">www.mip.informatik.uni-kiel.de</a> Tel.: 0431 / 880 4484
<b>Klaus-Dieter Kuhnert, Prof. Dr.-Ing. (ZESS)</b> Universitätsprofessor Zentrum für Sensorsysteme und Leiter des Instituts für Echtzeitlernsysteme <a href="mailto:kuhnert@fb12.uni-siegen.de">kuhnert@fb12.uni-siegen.de</a> <a href="http://www.zess.uni-siegen.de">www.zess.uni-siegen.de</a> <a href="http://www.ezls.fb12.uni-siegen.de">www.ezls.fb12.uni-siegen.de</a> Tel.: 0271 / 740 4779	<b>Hartmut Roskos, Prof. Dr. (PI)</b> Universitätsprofessor Physikalisches Institut J.W.-Goethe-Universität Frankfurt und Leiter der Arbeitsgruppe Ultrakurzzeitspektroskopie und Terahertz-Physik <a href="mailto:roskos@physik.uni-frankfurt.de">roskos@physik.uni-frankfurt.de</a> <a href="http://www.pi.physik.uni-frankfurt.de/femto/">www.pi.physik.uni-frankfurt.de/femto/</a> Tel.: 069 / 798 47214
<b>Hubert Roth, Prof. Dr.-Ing. (ZESS)</b> Universitätsprofessor Zentrum für Sensorsysteme und Institut für Regelungs- und Steuerungstechnik <a href="mailto:roth@zess.uni-siegen.de">roth@zess.uni-siegen.de</a> <a href="http://www.zess.uni-siegen.de">www.zess.uni-siegen.de</a> <a href="http://www.uni-siegen.de/rst/">www.uni-siegen.de/rst/</a> Tel.: 0271 / 740 4439	<b>Rudolf Schwarte, Prof. Dr.-Ing. (ZESS)</b> Universitätsprofessor Zentrum für Sensorsysteme und Institut für Nachrichtenverarbeitung <a href="mailto:schwarte@zess.uni-siegen.de">schwarte@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">www.nv.et-inf.uni-siegen.de</a> Tel.: 0271 / 740 3330
<b>Christof Rezk-Salama, Dr.-Ing. (ZESS)</b> Wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Computergraphik und Multimediasysteme <a href="mailto:rezk@fb12.uni-siegen.de">rezk@fb12.uni-siegen.de</a> <a href="http://www.cg.informatik.uni-siegen.de">www.cg.informatik.uni-siegen.de</a> Tel.: 0271 / 740 2826	<b>Torsten Löffler, Dr. phil. (PI)</b> Wissenschaftlicher Assistent am Physikalischen Institut der J.W.-Goethe-Universität Frankfurt <a href="mailto:t.loeffler@physik.uni-frankfurt.de">t.loeffler@physik.uni-frankfurt.de</a> <a href="http://www.pi.physik.uni-frankfurt.de/femto/">www.pi.physik.uni-frankfurt.de/femto/</a> Tel.: 069 / 798 47212

## 2 Vorhabensübersicht

### 2.1 Arbeitsgebiete der Antragsteller und ihrer Arbeitsgruppen

**Prof. Dr.-Ing. Andreas Kolb:** Computergraphik, Geometrische Modellierung, Modelloptimierung, Modellrekonstruktion, Rendering und Licht-Material-Interaktion, Wissenschaftliche Visualisierung, Virtual Environments

**Prof. Dr.-Ing. habil. Otmar Loffeld:** Optimale Signalverarbeitung, Estimationstheorie, Fusion von Multisensordaten, Remote Sensing, SAR, Modellbildung und Simulation

**Prof. Dr.-Ing. Peter Haring Bolívar:** Terahertz Technologie, Analytik und Bildgebung, Optische Speicher, Nichtflüchtige Speicher, Integrierte Optik, Ultraschnelle Optoelektronik

**Prof. Dr.-Ing. Reinhard Koch:** Computervision, visuelle 3D-Rekonstruktion, visuelles Tracking aus Kamerabildfolgen

**Prof. Dr.-Ing. Klaus-Dieter Kuhnert:** Echtzeit-Bildverarbeitung, Mustererkennung, Lernsysteme, verhaltensbasierte Robotik

**Prof. Dr. Hartmut Roskos:** Terahertz-Physik, Quantenoptik, Kurzzeiddynamik an metallorganischen Molekülen

**Prof. Dr.-Ing. Hubert Roth:** Industrie-Automatisierung und Medizintechnik, Steuer- und Regelungstechnik, Fusion von Multisensordaten und Informationsverarbeitung

**Prof. Dr.-Ing. Rudolf Schwarte:** Optische Kommunikationsverarbeitung, Photonik, 3D Bildgebung, PMD Sensortechnologie und PMD-Verarbeitung

**Dr. rer. nat. Torsten Löffler:** Terahertz-Physik, THz Imaging mit THz Pulsen

**Dr.-Ing. Christof Rezk-Salama:** Computergraphik, Wissenschaftliche Visualisierung und Renderingtechniken

### 2.2 Gesamtdauer

4 Jahre

### 2.3 Antragszeitraum

24 Monate

### 2.4 Gewünschter Beginn

01.01.2006

## 2.5 Zusammenfassende Darstellung des Paketes

Die Ausführungen dieser Präambel vermitteln einen Überblick über den im Gesamtpaket adressierten Problemkreis. Der Stand von Forschung und Entwicklung auf diesem Gebiet wird lediglich im Kontext der 3D-Sehens dargestellt. Die für die Teilprojekte spezifischen Ausführungen zum Stand der Forschung und zu den Vorarbeiten der Antragsteller erfolgen im jeweiligen Teilantrag. Dies gilt in gleicher Weise für die Literaturangaben.

Ziel dieses Antragspakets ist die koordinierte Bearbeitung aller kritischen Aspekte, die für eine reale und echtzeitnahe Umsetzung von dynamischem 3D-Sehen auf Basis der Photonic Mixer Device (PMD)-Technologie von Bedeutung sind. Dies beinhaltet die dynamisch-interaktive Verarbeitung von Multisensordaten, um 3D-Daten in Kombination mit 2D-Bilddaten zu hochauflösender 2D/3D-Information zusammenführen zu können. Ziel ist es dabei einerseits aus den Sensordaten interaktiv Messdaten zu erzeugen und anwendungsübergreifend aufzuarbeiten. Andererseits werden für dedizierte Anwendungsrichtungen spezifische Verfahren zur Lokalisation, Modellerfassung, -verfolgung und -rekonstruktion entwickelt.

Aufgrund der engen Vernetzung der Teilprojekte (siehe Abschnitt 2.7.1) werden erhebliche Synergieeffekte durch den direkten Austausch von Erkenntnissen und Daten erwartet.

## 2.6 Dynamisches 3D Sehen

Dieser Abschnitt gibt eine Übersicht über die Anwendungspotentiale des Dynamischen 3D Sehens (Abschnitt 2.6.1) und beschreibt kurz verschiedene Verfahren zur Entfernungsermittlung, wie sie bislang zum Einsatz kommen (Abschnitt 2.6.2). Abschließend wird in Abschnitt 2.6.3 das *Photonic Mixing Device (PMD)* erläutert und der Bezug zu bisherigen Techniken zur Entfernungsmeßung hergestellt.

### 2.6.1 Anwendungspotentiale des Dynamischen 3D Sehens

Die Ermittlung der Entfernung zu einem Objekt in der Umgebung und relativ zur Lage eines Sensors wird bereits sehr lange intensiv erforscht. In einigen Anwendungsbereichen wurden bereits Mitte des letzten Jahrhunderts grundlegende Techniken entwickelt, deren Prinzipien heute immer noch standardmäßig in operativen Systemen eingesetzt werden. Beispiele hierfür sind das Radar zur Flugzeugerfassung oder Sonar im Bereich der Schifffahrt.

Geht es jedoch um folgende Zielsetzungen

- echtzeitnahe Erfassung dynamischer Bewegungen von Objekten in einer Szenerie,
- echtzeitnahe 3D-Objekterkennung und relative Positionserfassung,
- hochauflösende 3D-Information mit sub-mm Tiefenauflösung

dann gibt es heute zwar eine Reihe von Ansätzen, von denen bislang aber keiner den Reifegegrad erreicht hat, der einen breiten operativen Einsatz ermöglicht (siehe auch Abschnitt 2.6.2).

Im Rahmen des Antragspaketes *Dynamisches 3D-Sehen* werden Forschungsthemen bearbeitet, die die vorgenannten Ziele auf Basis der vielversprechenden *Photonic Mixing Device (PMD)*-Technologie adressieren. Folgende Liste ausgewählter Anwendungsfelder zeigt das enorme Potential auf, welches durch die PMD-Technologie eröffnet wird:

**Industrie-Automatisierung:** In der Industrie-Automatisierung setzt eine echtzeitnahe Entfernungserfassung ein sehr großes Potential frei. Im Kontext der Sicherheit können autonome Systeme damit auf ein dynamisches Umfeld reagieren. Der Personenschutz kann ohne aufwendige und platzraubende Absperreinrichtungen auskommen, was zudem die Wartungszeiten verkürzt. Sortiersysteme können unmittelbar Objektvolumina abschätzen. Dies sind nur drei von vielen Einsatzmöglichkeiten der Technologie im Kontext der Industrie-Automatisierung.

**Automotive:** Für viele Systeme zur Unterstützung des Fahrers und zur Steigerung der Sicherheit im Automobilbereich spielt die Entfernungsmessung eine große Rolle. Eine echtzeitnahe Entfernungserfassung der Umgebung kann sowohl im Außenbereich (z.B. zur Kollisionsvermeidung) als auch im Innenbereich (z.B. zur Optimierung der Airbagsteuerung) des Automobils sehr nutzbringend eingesetzt werden.

**Wartung komplexer Systeme:** Das Wartungspersonal für komplexe Systeme ist zunehmend auf Ad-hoc-Information zur Durchführung von Arbeiten angewiesen (Technische Manuale, Lagerbestandsdaten, Fehleranalysedaten, etc.). Diese Informationen müssen in vielen Fällen visuell und kontextsensitiv aufbereitet werden, wozu eine Lokalisation der Person relativ zu dem zu wartenden System notwendig wird. Bis heute sind entsprechende Lokalisationsverfahren nur prototypisch in Laborumgebungen umgesetzt. Eine echtzeitnahe Entfernungserfassung bringt derartige Systeme einem operativen Einsatz deutlich näher.

**Digitale Medien:** Im Bereich der Film- und Fernsehindustrie, aber auch in anderen Medien, werden zunehmend reale mit virtuellen Elementen zu neuen, anwendungsspezifischen Darstellungen verknüpft. Zur Erfassung der realen Situation hinsichtlich Geometrie, Materialeigenschaften und Beleuchtung ist aktuell ein sehr großer Ressourcenaufwand erforderlich, der durch den Einsatz einer integrierten, echtzeitnahen Entfernungs- und Beleuchtungsmessung deutlich reduziert und qualitativ verbessert werden kann.

**Medizintechnik:** Zur Planung, Simulation und Durchführung von Operationen sind Systeme zur Positionserfassung bereits heute im Einsatz. Aktuell werden hierfür durchweg markerbasierte, optische Systeme eingesetzt. Eine Entwicklung hin zu markerlosen Systemen und zu Systemen zur echtzeitnahen Objekterfassung wird in der Medizintechnik neue Verfahren im Bereich der Operationstechnik ermöglichen.

Es sei angemerkt, dass der Begriff *echtzeitnahe Entfernungserfassung* stets als gleichzeitige Erfassung von Tiefendaten in einem *hinreichend großen Raumwinkel* relativ zur Sensorposition zu verstehen ist.

## 2.6.2 Bisherige Ansätze des 3D Sehens

Neben der in diesem Antragspaket zum Einsatz kommenden, relativ jungen PMD-Technologie (siehe Abschnitt 2.6.3), gibt es eine Reihe von Techniken zur Entfernung-

messung mit unterschiedlichen charakteristischen Eigenschaften. Die wesentlichen Ansätze sollen hier kurz erläutert werden.

**Laser Triangulierung** Bei diesem Verfahren wird ein Laserstrahl auf ein zu erfassendes Objekt gelenkt, während das Objekt gleichzeitig mit einem räumlich versetzten 2D-Bildsensor<sup>2</sup> aufgenommen wird. Die relative Lage von Laser zu Bildsensor wird hierbei als bekannt vorausgesetzt, wodurch die räumliche Lage des Laserstrahls relativ zum Bildsensor festliegt. Der vom Laserstrahl getroffene Oberflächenpunkt wird im Bildsensor erfasst, wodurch ein zweiter Strahl relativ zum Bildsensor gegeben ist. Der Schnitt dieses Strahls mit dem Laserstrahl ergibt die eindeutige 3D-Position des Oberflächenpunktes.

Algorithmisch ist dieser Ansatz sehr einfach und liefert sehr präzise Ergebnisse. So wurden beispielsweise im *Michelangelo-Projekt* [1] einige der wichtigsten Statuen von Michelangelo im Submillimeterbereich abgetastet. Der Nachteil des Ansatzes liegt darin, dass die Objekterfassung über einen echten Raumwinkel durch zeitversetztes Abtasten (*Scanning*) erfolgt, womit eine echtzeitnahe Entfernungsmessung unmöglich ist. Durch die algorithmisch bedingte Baseline<sup>3</sup> können zudem Verschattungseffekte auftreten. Für größere Entfernungen muss die Baseline entsprechend lang sein, was systembedingt zu einem großen apparativen Aufbau führt.

**Lichtlaufzeit Verfahren** Bei diesem Ansatz beruht die Entfernungsermittlung auf der Messung der Laufzeit von ausgesendetem Licht einer Laserlichtquelle über das Objekt zu einem Sensor, der sich in unmittelbarer Nähe der Lichtquelle befindet. Auf Basis der Laufzeit kann die Entfernung unmittelbar bestimmt werden. Zur Messung des Zeitversatzes zwischen dem Aussenden des Lichtes und dessen Erfassung wird das Licht entweder gepulst oder Amplituden- bzw. Frequenzmoduliert. Nach Entfernung des Hintergrundlichtes mittels eines Interferenzfilters sind die Amplitudenverläufe von ausgesendetem und empfangenem Licht über der Zeit zueinander proportional, während die Phasenverschiebung der Laufzeit des Signals entspricht. Wie bei der Laser-Triangulierung muss zur Entfernungserfassung in einem Raumwinkel sequentiell gescannt werden.

Das Lichtlaufzeitverfahren wird in einer Reihe kommerzieller Produkte eingesetzt, beispielsweise in Scannern der Firmen Sick AG [2], die allerdings nur in einer Ebene scannen.

**Strukturiertes Licht** Konzeptionell ist dieses Verfahren der Laser-Triangulierung sehr ähnlich. Der Unterschied besteht in der alternativen Verwendung eines Projektors anstelle des Laserstrahles. Der Projektor projiziert in schneller zeitlicher Abfolge eine *Bildmusterfolge* auf die zu erfassende Szene. Diese Bildmusterfolge ist so gestaltet, dass, mit Rücksicht auf die gewünschte räumliche Auflösung, jede beleuchtete Raumrichtung einen eindeutigen „Beleuchtungscode“ erhält. Durch Erfassung der Szene mit dem 2D-Bildsensor kann für jeden Bildpunkt der Code und damit die zugehörige Raumrichtung relativ zum Projektor ermittelt werden. Hieraus wird wiederum die eindeutige 3D-Position des entsprechenden Oberflächenpunktes bestimmt. Praktisch werden nicht einzelne Raumrichtungen, sondern

<sup>2</sup> hiermit ist, auch im folgenden, eine CMOS- oder CCD-Kamera gemeint

<sup>3</sup> Baseline bezeichnet den Abstand zwischen Laser und Bildsensor

geeignete ebene Strahlenbündel eindeutig kodiert, da der Schnitt des Strahles durch das Bildsensor-Pixel mit einer Strahlenebene bereits eindeutig ist.

Hinsichtlich der Bildmusterfolge gibt es unterschiedliche Möglichkeiten. Einerseits werden schwarz-weiß Codes verwendet, die entweder eine einfache, Barcode-ähnliche Struktur aufweisen (*gray-coded structured light*) oder ein wanderndes Sinusmuster darstellen (*phase-shifting*). Alternativ kommen auch Farbcodes zum Einsatz (*color structured light*), wodurch die gleiche räumliche Auflösung mit einer kürzeren Bildmusterfolge für die Kodierung erzielt werden kann.

Der Vorteil des Ansatzes mit strukturiertem Licht liegt in der zeitlich parallelen Erfassung eines spezifischen Raumwinkels, wodurch die Vermessung dynamischer Szenen möglich wird. Die Firmen Vialux, Chemnitz [3] oder ABW GmbH, Frickenhausen [4] bieten beispielsweise kommerzielle Produkte mit diesem Ansatz an. Die prinzipiellen Nachteile der Laser-Triangulierung (Verschattung und großer apparativer Aufbau) gelten auch hier. Hinzu kommen Probleme mit der Objekt-Reflektivität, die insbesondere bei Farbcodes die Codeerkennung erschweren. In vielen Fällen ist die Entfernungsmessung zudem nicht echtzeitnah, d.h. die Ermittlung der Entfernungswerte aus den erfassten Bilddaten ist sehr zeitaufwendig und erfolgt nicht interaktiv.

**Stereo-Vision** Der grundsätzliche Aufbau beim Stereo- oder Multiview Vision besteht aus zwei oder mehreren 2D-Bildsensoren, die zueinander eine bekannte, feste räumliche Anordnung besitzen. Durch die bekannte Anordnung der Sensoren bestehen über die Epipolar-Geometrie feste Beziehungen zwischen den 2D-Bilddaten der einzelnen Sensoren [5]. Diese werden dazu verwendet, effizient Korrespondenzen in den 2D-Bilddaten verschiedener Sensoren zu ermitteln, die zu demselben Oberflächenpunkt eines beobachteten Objektes gehören. Korrespondenzen werden durch lokale Ähnlichkeitsmaße ermittelt. Jede gefundene Korrespondenz kann unmittelbar in die 3D-Position des zugehörigen Objektpunktes umgerechnet werden.

Da dieses Verfahren bei schwach strukturierten Objektoberflächen Probleme bei der Ermittlung von Korrespondenzen hat, kann die passive Stereo-Technik mit einer aktiven Beleuchtung mit strukturiertem Licht ergänzt werden. Dieser Ansatz findet sich beispielsweise in dem kommerziellen Produkt Qlonerator der Firma 3Q, Atlanta, USA [6].

Die Akquisition der Sensordaten erfolgt in der Regel interaktiv, die vollflächige Berechnung der Entfernungswerte ist hingegen sehr rechenaufwendig und erfolgt offline.

**Parallel Range Sensing – ZCam** Dieser Ansatz weist eine gewisse Ähnlichkeit zu der PMD-Technologie auf (siehe Abschnitt 2.6.3), indem zu einem Zeitpunkt die Abstände in einem ganzen Raumwinkel über ein Lichtlaufzeit-Verfahren erfasst werden.

Die Laufzeitmessung beruht auf der Ausstrahlung sehr kurzer Lichtimpulse, deren Reflexionen von dem beobachteten Objekt unter Einsatz einer zeitlich hochgenauen, hochdynamischen Verschlusstechnik (*gating*) mit einem normalen CCD-Sensor erfasst werden. Die Relation der in einem CCD-Pixel beim gating gemessenen Lichtintensität zu der gesamten reflektierten Intensität stellt ein Laufzeitmaß innerhalb der Dauer des Lichtimpulses dar. Die Impulsdauer und das Timing des Gatings legt damit den Tiefenmessbereich fest und ist

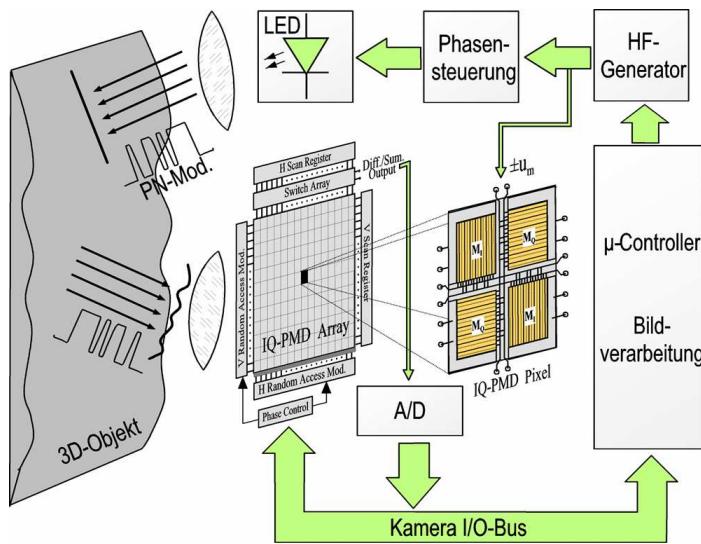


Abbildung 1: Prinzipieller Aufbau eines PMD-Entfernungssensors (Bildquelle: PMD Technologies GmbH)

direkt proportional zur Genauigkeit des Systems.

Die Firma 3DV Systems, Israel [7] setzt den Parallel Range Sensing Ansatz in ihrem Produkt ZCam um. Die Anwendung hierfür liegt vornehmlich im Studiobereich. Wesentliche Beschränkungen des Systems liegen in seiner relativ geringen Genauigkeit von ca. 1-2% des Tiefenmessbereiches, einem hohen Energiebedarf von ca. 750 W und einem hohen Gewicht von ca. 16 kg.

### 2.6.3 Das Photonic Mixing Device (PMD)

Im Vergleich zu den in Abschnitt 2.6.2 vorgestellten Entfernungsmesstechniken, kann das PMD-Prinzip kurz gefasst als *2D-Feld von Photomischsensoren* verstanden werden, mit deren Hilfe im Lichtlaufzeit-Verfahren Entfernungen gemessen werden. Über die zwei Raumdimensionen des Arrays und die Entfernungsinformation kann durch eine geeignete Abbildung direkt und simultan die 3D Umgebung erfasst werden. Die PMD-Technologie ist aufgrund ihrer integrierten Form ein kostengünstiger Sensor zur parallelen Entfernungsmessung.

Der Grundgedanke des PMD-Ansatzes ist in Abbildung 1 dargestellt. Die zu vermessende Szene wird mit inkohärentem, moduliertem Licht einer i.a. aus LEDs bestehenden Beleuchtungseinheit bestrahlt. Der PMD-Sensor, bestehend aus einem Array von so genannten *Smart Pixels*, empfängt das von den Objekten der Szene reflektierte, modulierte Licht. Die Demodulation erfolgt durch Korrelation des empfangenen, modulierten Lichtsignals mit dem Modulationssignal der Beleuchtungseinheit. Mit dieser Information kann die Phasenverschiebung und damit die Entfernung bestimmt werden.

Die beiden wesentlichen Varianten der PMD-Technologie sind das *Photogate-PMD (PG-PMD)* und das *Selbstmodulations-PMD*. Die beiden PMD Konzepte unterscheiden sich hierbei in den Prinzipien mit denen die Demodulation an jedem Pixel durchgeführt wird.

Bei einem PG-PMD-Pixel sind in der Pixel-Mitte zwei transparente Modulationselektroden

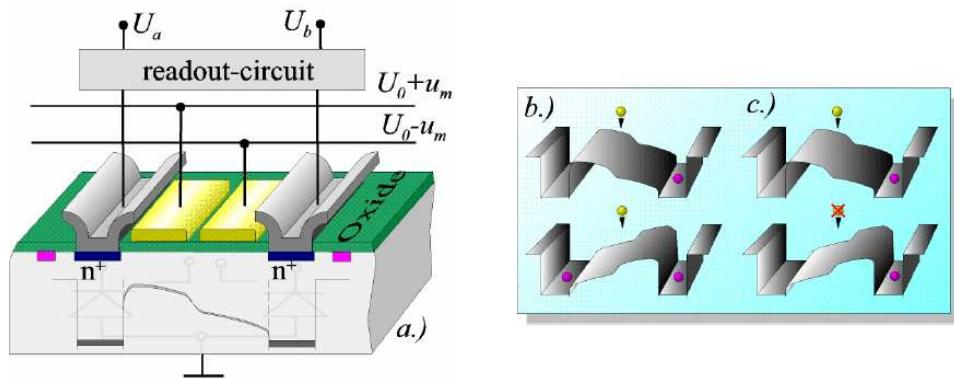


Abbildung 2: Der Aufbau eines PMD-Pixels (a) und die Ladungsträgerschaukel bei konstantem Lichteinfall (b) und bei moduliertem Lichteinfall ohne Laufzeitverzögerung (c), hier sammelt sich die Ladung auf einer Seite (Bildquelle: PMD Technologies GmbH).

platziert, die mit dem Modulationsgenerator der Beleuchtung gekoppelt sind (Abbildung 2 (a)). Die anliegende Modulationsspannung erzeugt eine *Ladungsträgerschaukel*, welche die durch die einfallenden Photonen angeregten Elektronen wahlweise an die linke bzw. rechte Auslesediode abfließen lässt (Abbildung 2 (b) und (c)). Die Lichtmodulation und deren Phasenverschiebung zu dem elektrischen Referenzsignal führt zu einer Spannungsdifferenz zwischen den beiden Auslesedioden. Diese Spannungsdifferenz steht in direktem Zusammenhang zu dem Phasenunterschied zwischen Licht- und der Pixelmodulation und entspricht der Signalabtastung einer Korrelationsfunktion bei einem fixen Phasenwert. Durch eine sequentielle Abtastung bei mehreren Referenzsignalphasen wird die komplette Korrelationsfunktion ausgelesen und die Phasenverschiebung durch eine einfache trigonometrische Beziehung berechnet. Dieses Konzept kann vollständig in CMOS Technologie realisiert werden, wodurch enorme Kostenvorteile entstehen. Nachteil ist, dass sequentiell mehrere Phasenwerte (typischerweise 3-4) ausgelesen werden müssen um die vollständige 3D Information zu erhalten.

Eine Herausforderung des PG-PMD ist die *Unterdrückung des Hintergrundlichtes*. Das Hintergrundlicht hat prinzipiell keinen Einfluss auf die Spannungsdifferenz an den Auslesedioden, solange diese nicht gesättigt sind. Beim PG-PMD wird die Sättigung mit einer zusätzlichen, aktiven Schaltung auf dem Chip (*Suppression of Background Illumination (SBI)*) vermieden.

Das *Selbstmodulations-PMD* löst das Problem der Hintergrundlichtunterdrückung durch einen alternativen Aufbau. Der Grundgedanke ist dabei, das demodulierte Signal direkt zu detektieren (Abbildung 3). Dies wird erreicht, indem das Modulationssignal als Analogspannung  $\pm u_m(t)$  an eine *Metal-Semiconductor-Metal (MSM)* Photodiode angelegt wird, die über eine geeignete Verschaltung aus Einkoppelkapazitäten (Hochpass) und einem Auslesernetzwerk (Tiefpass) betrieben wird. Wegen des symmetrischen Aufbaus der MSM Dioden heben sich die unkorrelierten Beiträge des Hintergrundlichts im linken Auslese-Stromkreislauf auf. Effektiv bleibt nur das korrelierte Signal erhalten und das Hintergrundlicht wird eliminiert. Aktuell wird der Selbstmodulationsansatz in Form von Gallium-Arsenid MSM Strukturen realisiert. Dadurch wird eine enorme Bandbreite von über 100 GHz und eine hohe Phasenauflösung des PMD Verfahrens erzielt. Allerdings ist eine entsprechende III-V-Halbleitertechnologie signifikant kostenaufwendiger als Standard CMOS Verfahren, auf welche das PG-PMD aufbaut.

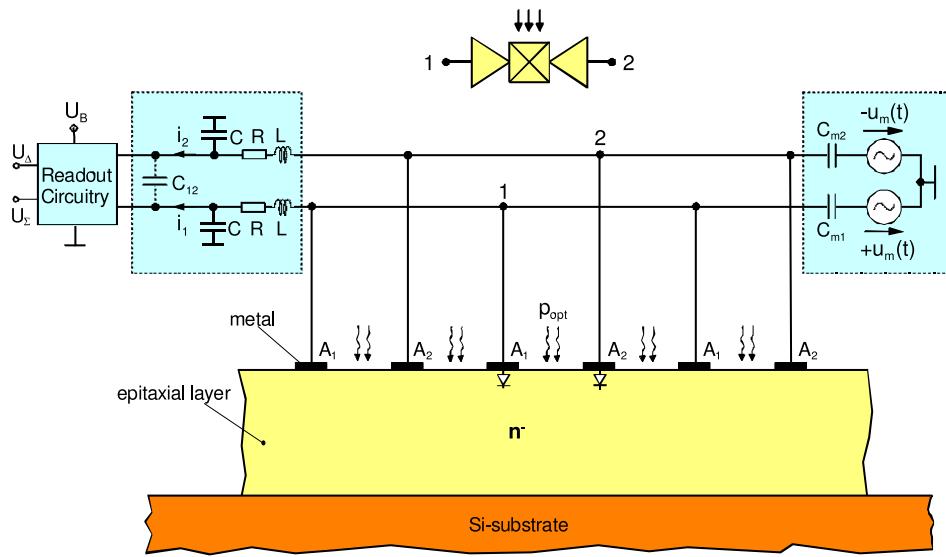


Abbildung 3: Querschnitt einer MSM-PMD Struktur (unterer Teil der Abbildung) mit vereinfachter Selbstmodulationsschaltung.

Für weitere Details zur PMD-Technologie wird auf Sekundärliteratur verwiesen: Kraft et. al. [8], Schwarte et. al. [9], Lange [10] und Xu et. al. [11].

Die aktuelle PMD-Kamera *PMD Vision 19k* der Firma PMD Technologies GmbH, die auf dem Photogate-Prinzip basiert, hat folgende Kenngrößen [12]:

Auflösung	$120 \times 160$ Pixel
Pixelgröße	$40\mu m \times 40\mu m$
Optischer Füllfaktor	30%
max. Entfernung	7.5m
Tiefenauflösung	> 6mm
3D-Bildrate	> 10 FPS

Zentrale Herausforderungen in der Weiterentwicklung von PMD-Chip und PMD-Kamera aus Sicht der Fa. PMD Technologies GmbH sind:

- die Verbesserung der Empfindlichkeit zur Erhöhung der Reichweite bzw. zur Verringerung der erforderlichen Lichtleistung
- die Steigerung der Framerate
- die Verkleinerung des Kamerasytems
- eine weitere Verbesserung der Hintergrundlichtunterdrückung, insbesondere auch bei kleinen Pixeln

In den beantragten Teilprojekten *MultiCam* und *2D3DProc* werden weitere Problemfelder in der systemnahen Verarbeitung der Sensordaten untersucht.

## 2.7 Ziele des Antragspaketes

Die nachstehenden Abschnitte beschreiben kurz die wissenschaftlichen Ziele des Antragspaketes, die Vernetzung der Einzelanträge, sowie die im Antragspaket adressieren Problemkreise.

### 2.7.1 Wissenschaftliche Ziele und Vernetzung der Einzelanträge

Die wissenschaftlichen Ziele des Antragspaketes *Dynamisches 3D Sehen* gehen von den aktuell verfügbaren PMD-Sensorchips aus. Im Rahmen des Paketes werden alle relevanten Fragestellungen des hardwaretechnischen Kameraaufbaus, der Datenaufbereitung und der sensornahen Datenverarbeitung untersucht, sowie für eine Reihe von Anwendungsrichtungen vertieft.

**2D/3D-Multisensorentwicklung:** Aus Sicht der Sensorik konzentrieren sich alle Anträge dieses Paketes auf eine Kombination von Standard 2D- und 3D-Sensorchips auf Basis der PMD-Technologie. Der Inhalt des ersten Themenschwerpunktes konzentriert sich auf die Erstellung einer Systemplattform für Multisensor-Hardware zur dynamischen Erfassung von 2D/3D-Daten, wobei monokulare und binokulare Aufbauten, sowie Multi-Kamera-Aufbauten berücksichtigt werden.

**Kalibrierung und Datenfusion:** Der Einsatz von 2D/3D-Multisensordaten erfordert zunächst die Umwandlung der Sensor- in Messdaten. Die hierfür notwendige Kalibrierung ist ein wichtiger erster Schritt zur Nutzung der Multisensordaten. Die Fusion der Daten und deren transparente Nutzung, sowie die lokale Korrektur von Sensorfehlern und die lokale Verfeinerung der groben Tiefeninformation ist für eine Vielzahl von angrenzenden Forschungsfeldern wichtig.

**Simulation von 2D/3D-Multisensoren:** Bei der Simulation stehen Fragestellungen zur Modellierung des Bildgebungsprozesses für 2D/3D-Multisensorsysteme unter Einbeziehung physikalischer Effekte und auftretenden Störphänomene im Vordergrund. Wichtig ist hierbei auch der quantitative Abgleich mit idealen Sensordaten, auf deren Grundlage eine Validierung von Verarbeitungsalgorithmen ermöglicht wird.

**Lokalisation und Modellbildung:** Im Rahmen des Antragspaketes wird das Problem der relativen Positionsbestimmung eines 2D/3D-Sensors zu einem oder mehreren erfassten Objekten untersucht. Abhängig von der Anwendungsrichtung werden zudem Fragestellungen der Bildung räumlicher Modelle erforscht, wobei dies sowohl die Repräsentation als Oberflächenmodell als auch die Kartografierung geeigneter Landmarken umfasst. Die Modelle können neben der geometrischen Information zusätzliche Beleuchtungsdaten umfassen.

**Objekterfassung und -verfolgung:** Die Fragestellung der Erfassung bekannter und unbekannter Objekte mit Hilfe von anwendungsspezifischen 2D/3D-Kamerakombinationen ist ebenfalls Bestandteil des Antragspaketes. In diesem Kontext werden Techniken zur Fusion von Beleuchtungs- und Entfernungsinformationen und zur echtzeitnahen Bildsynthese für einen Objektvergleich untersucht. Zudem ist die Verfolgung von Objekt-Features ein wichtiger Forschungsgegenstand.

**THz Kamera Entwicklung:** In einem Teilprojekt wird angestrebt, den Anwendungsbe- reich der PMD-basierten Bildgebung spektral zu erweitern. Mittels elektrooptischer Verfahren soll die PMD Kamera auch im THz-Frequenzbereich eingesetzt werden, um neue Anwendungsfelder abdecken zu können. Neben einer deutlich höheren Tiefen- auflösung ermöglicht eine THz Kamera chemisch selektive Analysen, die beispielsweise in der Sicherheitstechnik ein hohes Potential besitzen.

Die einzelnen Fragestellungen weisen eine enge thematische Kopplung auf. Inhaltliche Abhängigkeiten, die zu Beeinträchtigungen in einzelnen Projekten führen könnten, werden im Rahmen des Projektes durch eine enge Kooperation vermieden. So werden beispielsweise unmittelbar zu Projektbeginn durch die Projekte *PMDSim* und *2D3DProc* Simulationsdaten für PMD- und 2D/3D-Kameras zur Verfügung gestellt. Zudem sind aus Forschungssicht die direkten Rückkopplungen zwischen den Projekten von großer Bedeutung. Dadurch wird der gesamte Problemkreis konzeptionell vollständig durchdrungen und alternative Lösungs- ansätze, die sich in der Umsetzungsphase der Teilprojekte zwangsläufig ergeben werden, können direkt in den angrenzenden Forschungsschwerpunkten eingebracht und bewertet werden.

Alle Teilprojekte des Antragspakets im Überblick:

Kürzel	Antragstitel	Antragsteller
MultiCam	2D/3D Multisensorentwicklung	Loffeld, Roth, Schwarze
PMDSim	2D/3D-Sensorsimulation	Loffeld, Kolb
2D3DProc	2D/3D Datenverarbeitung und -fusion auf Basis der PMD-Technologie	Kolb, Loffeld
3DPoseMap	3D-Poseschätzung und 3D-Mapping mittels PMD- Kamera	Koch, Roth
PMDLumi	Echtzeit-Akquisition bildbasierter 3D-Modelle zur Objekterkennung	Kolb, Kuhnert, Rezk-Salama
3DTHz	3D Bilderfassung im Terahertzfrequenzbereich ba- sierend auf elektrooptischer Detektion	Haring, Roskos, Schwarze, Löffler

Das thematische Zusammenwirken der Teilanträge im Gesamtpaket wird in Abbildung 4 veranschaulicht. Teilanträge des Pakets sind mit Rechtecken dargestellt und gelb hinterlegt. Die Interaktionen zwischen den Teilvorhaben sind vielfältig und werden durch Pfeile dar- gestellt, die zum einen den Datenfluss zwischen den Teilprojekten kennzeichnen (schwarze Pfeile), zum anderen den Know-How Fluss in Form von Modellkenntnissen, Austausch von entwickelten Werkzeugen und Verfahren (blaue Pfeile).

Die Gesamtheit aller beantragten Teilprojekte spannt einen Bogen von der Simulation und Entwicklung verschiedener 2D/3D-Kameraaufbauten (Teilprojekte *PMDSim* und *MultiCam*) hin zu den Forschungsfeldern Lichtfeldmessung und Objekterkennung (Teilprojekt *PMD- Lumi*), sowie Positionsschätzung und Umgebungserfassung (Teilprojekt *3DPoseMap*). In beiden Forschungsfeldern eröffnet der Einsatz der 2D/3D-Daten völlig neuartige Vorge- hensweisen, welche das Potential haben, die essentiellen Entwicklungen hin zu mehr Inter- aktivität und Robustheit deutlich zu befördern. Abgerundet wird das Antragspaket durch Anträge im Bereich der multidimensionalen Datenverarbeitung und -registrierung (Teilpro-

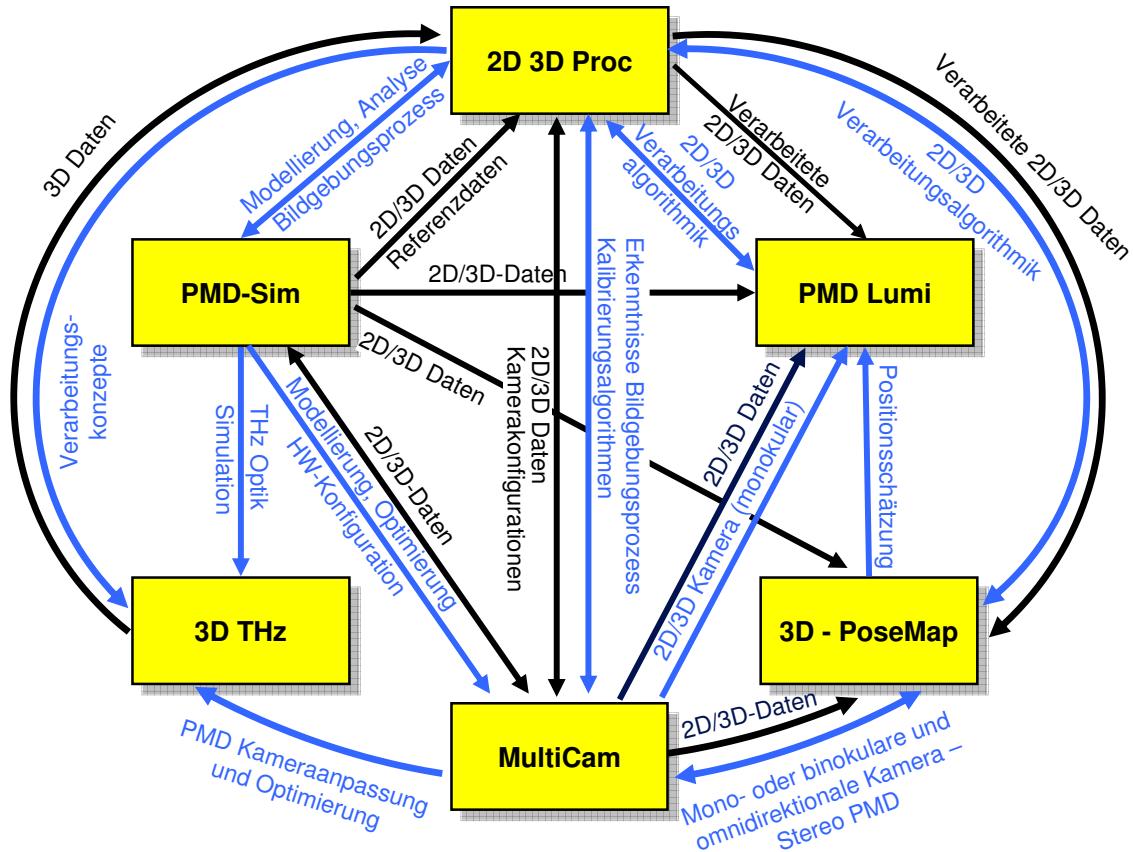


Abbildung 4: Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Teilprojekten des Antragspaketses *Dynamisches 3D-Sehen*. Schwarze Pfeile weisen auf den Austausch von Daten hin, blaue Pfeile stellen den Austausch von Know-How, Erkenntnissen, Werkzeugen oder Algorithmik dar.

pekt 2D3DProc) und der Erweiterung des nutzbaren Frequenz- bzw. Entfernungsbereiches (Teilprojekt 3DTHz). Die Gesamtheit der sechs Teilanträge deckt damit alle wesentlichen Fragestellungen zum Einsatz der PMD-Technologie in der Grundlagenforschung ab.

Weitere, detailliertere Erläuterungen zu den Verknüpfungen zwischen den einzelnen Teilprojekten finden sich in den Einzelanträgen des Antragspakets.

### 2.7.2 Einzel-Bestandteile des Pakets und adressierte Problemkreise

Folgende Problemstellungen werden im Rahmen des Antragspakets behandelt. Eine Reihe von Fragestellungen werden in mehreren Projekten aus unterschiedlichen Problemkontexten heraus untersucht:

- Entwicklung verschiedener Multi-Kameraaufbauten zur Kombination von 2D- und 3D-Sensorik mit unterschiedlichen optischen Randbedingungen und räumlichen Anordnungen.
- Systemtheoretische Betrachtung eines PMD-Sensors zum Aufbau eines frei parametrisierbaren 3D-Sensors.

trisierbaren Simulators unter Berücksichtigung diverser Störeinflüsse.

- Untersuchung des PMD-Bildgebungsprozess zur Umwandlung von PMD-Sensordaten in Tiefenmesswerte inkl. der Erstellung eines entsprechenden mathematischen Modells und der Erarbeitung technischer Methoden zur Kalibrierung von 2D/3D-Kamerakombinationen.
- Koregistrierung mehrerer 2D/3D-Kameras in räumlich dynamischer Lage.
- Fusion von 2D/3D-Daten inkl. Ausgleich von Sensorfehlern und lokaler Verfeinerung der Tiefendaten, sowie Speicherung der Messdaten zur deren effizienten Verfügbarmachung.
- Entwurf von Algorithmik und Datenstrukturen zur interaktiven Akquisition von Lichtfeldern.
- Verfahren zur effizienten Bildsynthese aus Lichtfeldern zur Erkennung und Lagebestimmung bekannter Objekte.
- Fusion von 2D/3D-Daten mit inertialer Sensorik zur echtzeitnahen Lokalisation und Poseschätzung.
- Umgebungsmodellierung durch 2D/3D-Daten zur schnellen Lokalisation und zur Fahrwegbestimmung autonomer Systeme.
- Entwicklung und Optimierung einer aktiven 3D-THz Kameratechnologie mit sub-mm Tiefenauflösung.

## 2.8 Zusammenfassungen der Einzelvorhaben

Im Folgenden werden die wesentlichen Aspekte der einzelnen Teilprojekte in Form von erweiterten Zusammenfassungen dargestellt.

### 2.8.1 2D/3D Multisensorentwicklung (MultiCam)

Im Fokus des Teilprojekts *MultiCam* steht die Systementwicklung für eine echtzeitfähige Kamerasystemplattform und die Verifikation der Leistungsparameter anhand einiger relevanter Anwendungsszenarien. Wesentlicher Aspekt ist die schnelle Erfassung von 3D-Informationen mittels einer chipbasierten Phasenmessung (PMD-Technologie) und einer damit synchronisierten 2D-Bilddatenerfassung mittels CMOS/CCD-Bildsensoren in Verbindung mit einer hardwareunterstützten Signal- und Datenverarbeitung.

Die Möglichkeiten der Fusionierung von 2D- und 3D-Daten und die Qualität der Koregistrierung hängen von der Konzeption und Struktur der Multichip-Kamera ab. Zudem werden wichtige Aspekte der Beleuchtungskonfiguration des Bildsensors und der aktiven Beleuchtungssteuerung in Verbindung mit den Möglichkeiten der Kalibrierung der Konfigurationen untersucht. Unter dem Aspekt der Echtzeitfähigkeit werden neben optimierten Verfahren für den Datenfluss und für die Datensynchronisierung neue Möglichkeiten der Bilddatenauswertung mit dem Ziel des synchronisierten Auslesens der 2D/3D-Daten entwickelt. Hier

werden verschiedene Aufbauten und Verfahren der chipbasierten Vorverarbeitung auf Basis der im ZESS vorhandenen System on Programmable Chip (SoPC) Technologie untersucht. Zielsetzung ist hierbei die 2D-registrierte 3D-Messung für Echtzeitanwendungen.

Für die Entwicklungen und Untersuchung wird ein Testfeld für Dynamisches 3D-Sehen erweitert (siehe auch Hinweis zu einem beantragten BMBF-Projekt in Abschnitt 2.9.2). In diesem Testfeld sind registrierte Bewegungen von Kameras und Objekten möglich. Dadurch können die verschiedenen Einflüsse der Beleuchtung, der optischen Komponenten und der Chip-/Kameraanordnungen im Detail wiederholbar verifiziert werden. Das Testfeld wird über eine IP-basierte Schnittstelle Remote-Experimente für die anderen Teilprojekte zur Verfügung stellen.

### 2.8.2 2D/3D-Sensorsimulation (PMDSim)

Das Ziel dieses Teilverhabens besteht darin, einen Simulator für eine 2D/3D-Kamera, basierend auf einer Kombination eines 3D-PMD-Sensors und eines hochauflösenden 2D-Bildsensors zu entwickeln. Der Simulator wird dabei unterschiedliche Sensorgeometrien und konstruktive Designs berücksichtigen und flexibel parametrierbar sein. Alle physikalischen Effekte und auftretenden Störphänomene sollen realitätsgetreu dargestellt werden, sowie Test- und Referenzdaten für die nachfolgende Verarbeitung erzeugen. Insbesondere die Möglichkeit, auftretende Störungen realitätsnah erzeugen und einem idealen (Referenz-)Bild überlagern zu können, schafft dabei wichtige Voraussetzungen zur qualitativ und quantitativ Validierung von 2D/3D-Algorithmen in anderen Teilprojekten. Durch den Einsatz von „system in the loop“-Techniken können simulierte Sensordaten zudem zum Test der Sensorsystemtechnik eingesetzt werden. Ferner erzwingt der Aufbau eines Simulators eine in die Tiefe gehende, qualitative und quantitative Modellbildung, die wiederum für eine modellgestützte 2D/3D-Bildverarbeitung unverzichtbar ist. Im Kontext der Modellbildung wird sehr eng mit den Teilprojekten *2D3DProc* und *MultiCam* kooperiert.

Computergestützte 3D-Sensor-Simulationen bieten damit nicht nur eine kostengünstige Alternative zur realen experimentellen Aufbauten, sondern erweisen sich als sehr hilfreich bei der Dimensionierung und Parametrierung von 3D-Sensoren inkl. der dedizierten Sensorsystemtechnik (system on programmable chip) und der nachfolgenden Verarbeitung.

### 2.8.3 2D/3D Datenverarbeitung und -fusion auf Basis der PMD-Technologie (2D3DProc)

Dieses Teilprojekt fokussiert sich auf die sensornahen Datenverarbeitung. Aus Verarbeitungs-sicht liefern die verschiedenen 2D/3D-Kamerakombinationen die Daten, die verarbeitet werden (siehe auch Teilprojekt *MultiCam*). (Teil-)Ergebnisse dieses Projektes stehen unmittelbar in anderen Teilprojekten, insbesondere in *PMDLumi* und *3DPoseMap*, zur Verfügung. Die Unabhängigkeit der Teilprojekte wird durch bereits existierende Kameraaufbauten und Simulatoren gesichert.

Ein Schwerpunkt des Projektes ist die Erforschung der Abbildungsmethodik der PMD-Kamera und entsprechender mathematischer Modelle für die Umwandlung der Sensor- in Messdaten. Darauf aufbauend werden praktische Methoden zur Kalibrierung von 3D-PMD-

Kameras und 2D/3D-Kamerakombinationen entwickelt, welche die Chip-orientierten Kalibrierungsansätzen des Teilprojektes *MultiCam* ergänzen. Hierbei sind unterschiedliche Ursachen von Verzerrungen der Sensordaten zu untersuchen und zu modellieren bzw. effizient zu korrigieren um eine interaktive Verarbeitung der Sensordaten zu ermöglichen. Es können statische und dynamische, mono- und multiokulare Sensoraufbauten zum Einsatz kommen, die zudem unterschiedliche räumliche Auflösungen aufweisen. Entsprechend sind Datenstrukturen und Algorithmen für eine effiziente Speicherung und einen transparenten Zugriff auf die Daten zu optimieren. Im Falle örtlich dynamischer Sensoraufbauten spielt zudem die Koregistrierung verschiedener, in sich statischer Kamerakombinationen eine wichtige Rolle. Darüber hinaus werden in diesem Teilprojekt Methoden zur lokalen Verfeinerung und Korrektur der grob aufgelösten und teilweise verrauschten PMD-Messdaten unter Einsatz der hochauflösenden 2D-Bilddaten untersucht.

#### **2.8.4 3D-Poseschätzung und 3D-Mapping mittels PMD-Kamera (3DPoseMap)**

In Echtzeit durchgeführte Positions- und Orientierungsschätzung (*Poseschätzung*) einer 2D-Kamera ist Basis für zahlreiche Anwendungen in den Bereichen Computer Vision und Robotik. Für dieses Problem existieren bereits diverse Lösungen, die aber in Genauigkeit und Stabilität der Schätzung für viele Anwendungen nicht ausreichend sind. Problematisch ist hierbei vor allem die Navigation in dynamisch veränderlichen Szenen, wie sie bei der Bewegung in realen Umgebungen oft vorkommen, z.B. durch bewegte Objekte oder Menschen.

Zur Stabilisierung des Poseschätzproblems soll in diesem Teilprojekt zusätzlich zu der 2D-Kamera eine 3D-PMD-Kamera eingesetzt werden (siehe Teilprojekt *MultiCam*). Die hiermit erzeugten Posedaten sowie die anfallenden 3D-Tiefendaten sollen genutzt werden, um die eigenständige Registrierung und Navigation eines Fahrzeuges in einer unbekannten Umgebung zu realisieren. Die Posedaten werden dazu mit den Daten weiterer Sensoren (z.B Odometer, Inklinometer) fusioniert und es wird eine 3D-Umgebungskarte erstellt, die eine konkrete Pfadplanung ermöglicht.

Zusätzlich erlaubt der neue Ansatz eine Detektion und Verfolgung sowohl starrer als auch sich deformierender, bewegter Objekte. Diese Informationen sollen zur dynamischen Navigation und Kollisionsvermeidung und im weiteren Verlauf des Projektes zum Motion-Capture, d.h dem Tracken der Bewegung und Gestik von Menschen, genutzt werden. Anwendungen finden sich hier z.B. in der Medizin (Ganganalyse) oder Film-Industrie (Markerlose Bewegungserfassung von Personen).

#### **2.8.5 Echtzeit-Akquisition bildbasierter 3D-Modelle zur Objekterkennung (PMDLumi)**

Das Ziel des Projekts ist die Entwicklung eines funktionsfähigen Gesamtsystems bestehend aus der echtzeitfähigen Rekonstruktion von geometriounterstützten Lichtfeldern (Lumigraph) mit Hilfe der PMD-Technologie und dessen Anwendung zur bildbasierten Objekterkennung, die nach dem Prinzip der Analyse durch Synthese arbeitet. Bildbasierte Modelle realer Objekte sollen mit diesem System interaktiv aufgenommen werden. Die Lichtfeldrekonstruktion bietet den Vorteil, dass sie anschließend eine photorealistische Bildsynthese in Echtzeit ermöglicht. Dieser Vorteil soll für die bildbasierte Objekterkennung genutzt werden.

Die Erkennung von Objektklasse und Raumlage erfolgt dabei durch iterative Annäherung an die optimalen Syntheseparameter durch fortgesetzten Vergleich.

Zur interaktiven Lumigraph-Akquisition werden 2D/3D-Kameras eingesetzt (siehe Teilprojekt *MultiCam*) und für die praktische Modellgewinnung mit einem visuellen Feedback zur direkten Kontrolle der jeweils aktuellen Bildqualität versehen. Die Kombination der 3D-Informationen aus der PMD-Kamera mit dem erzeugten Lichtfeld erlaubt die echtzeitnahe Erzeugung photorealistischer Ansichten des Modells und eröffnet damit die Möglichkeit, diese synthetischen Bilder mit hoher Präzision mit einer zu erkennenden 2D/3D-Aufnahme zu vergleichen.

Im Erkennungsprozess werden ausgehend von einer initialen Schätzung fortwährend neue Hypothesen über die Gestalt, die Lage und die Beleuchtung der zu erkennenden Objekte erzeugt. Durch den ständigen Zugriff auf die Lichtfelddaten können diese bewertet und die Parameter passend eingestellt werden. Da die Synthese in Echtzeit erfolgt und spätestens nach Beendigung einer Initialisierungsphase nur wenige Schritte für die Analyse notwendig sind, soll auch das Erkennungssystem in Echtzeit arbeiten.

### 2.8.6 3D Bilderfassung im Terahertzfrequenzbereich basierend auf elektrooptischer Detektion (3DTHz)

In diesem Teilprojekt wird angestrebt, den Anwendungsbereich von PMD basierten bildgebenden Systemen für Zielfrequenzen im Terahertz Frequenzbereich spektral zu erweitern. Dabei soll ein THz Abbild nach aktiver Beleuchtung mit einer kontinuierlichen THz Quelle mittels elektrooptischer Verfahren in ein optisches Signal umgewandelt werden, um dann von der PMD Kamera detektiert werden zu können. Dabei sind verschiedene Aspekte zu bearbeiten: Zunächst müssen effektive, phasenstabile Synchronisationskonzepte zwischen THz Beleuchtung und PMD Detektor etabliert und optimiert werden ( $Jitter \ll 1 \text{ ps}$ ). Damit kann in der Folge die PMD Kamera als phasenempfindliches 2D-Detectionsarray für freilaufende continuous wave (cw) THz Strahlungsquellen untersucht und optimiert werden. Dabei sind signifikante Verbesserungen der elektrooptischen THz Feldabtastung zu erforschen. Letztendlich kann die entsprechende Technologie für den Einsatz eines solchen Detektionsarrays zur 3D-Bilderfassung untersucht werden.

Die Stärke des Vorschlags besteht darin, dass weitgehend auf existierende physikalische Prinzipien und Systeme zurückgegriffen wird. Dies erlaubt den technologischen Aufwand einer THz-Kameraentwicklung auf einen durch einen DFG Normalverfahren finanzierbaren Rahmen zu reduzieren. In diesem Projekt soll daher erstmalig die Kombination der PMD-Detektortechnologie mit cw elektrooptischer (EO) THz Detektion untersucht werden. Ein solches kombiniertes EO-PMD Gesamtkonzept könnte dabei vielfältige neue Perspektiven zur Entwicklung eines bildgebenden Universalsystems für einen breiten Einsatz in unterschiedlichen THz-Anwendungsfeldern eröffnen. Durch die Erforschung dieses Konzepts kann die Entwicklung von real nutzbaren THz Systemen deutlich unterstützt werden. Neben einer deutlich höheren Tiefenauflösung solcher Systeme, die auch für die Anwendungsbereiche des Antragspaketes von Bedeutung ist, könnte eine THz Kamera beispielsweise chemisch selektive Analysen ermöglichen die in der Sicherheitstechnik ein hohes Potential haben.

## 2.9 Bezüge

### 2.9.1 Die PMD-Technologie als Innovation

Nach über zwanzig Jahren Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Optoelektronik und Photonik ist Prof. Rudolf Schwarte mit seiner Siegener Forschergruppe mit der PMD-Technologie ein Durchbruch im Bereich des 3D-Sehens gelungen. Die Idee für den Photo-Misch-Detektor hatte Prof. Schwarte bereits im Jahr 1996, erste tragfähige Halbleiterstrukturen und Schaltungskonzepte wurden in den folgenden Jahren im ZESS entwickelt. Auf Basis dieser Entwicklung wurden Prof. Schwarte, Dr. Buxbaum (derzeit Geschäftsführer der PMD Technologies GmbH) und Dipl.-Ing. Gollewski im Jahre 2002 als eines von vier Forscherteams für den *Deutschen Zukunftspreis* nominiert.

Die Firma PMD Technologies GmbH, gegründet im Jahre 2002, arbeitet seither vornehmlich in den Anwendungsfeldern *Automotive* und *Industriesensorik*. Die Beteiligung der Audi AG an PMD Technologies GmbH befördert vor allem die Entwicklung von Systemen für die passive und aktive Sicherheit im Automobilbereich. Beispielsweise wird die Airbagsteuerung durch räumlicher Erfassung von Insassen optimiert. Im Bereich der Industriesensorik arbeitet PMD Technologies GmbH vornehmlich mit der Firma ifm electronic zusammen. In dieser Kooperation ist der mit dem *Hermes Award 2005* ausgezeichnete Einpixel-PMD-Sensor *efector PMD* entstanden. Der efector PMD ist mit einer Größe von  $42 \times 42 \times 51 \text{ mm}$  eine äußerst kompakte Komponente, die beispielsweise zur Positionierung, Geschwindigkeitsregelung oder Füllstandsmessung industriell eingesetzt wird.

Der PMD-Ansatz wird auch von dem schweizer Unternehmen CMES in ihrem Produkt *Swiss Ranger SR-2* [13] und von der amerikanischen Firma Canesta in dem Produkt *CanestaVision EP* [14] umgesetzt.

### 2.9.2 Weitere Forschungsanträge zum Thema PMD

Neben den Anträgen dieses Paketes sind den Antragstellern weitere Forschungsaktivitäten im PMD-Kontext bekannt.

Zeitlich parallel zu dem vorliegenden Antragspaket wird von Prof. Wörn, Leiter des Institutes für Prozesstechnik, Automation und Robotik (IPR) der Universität Karlsruhe im Kontext der Prozeß- und Automatisierungstechnik ein Antrag unter Einbeziehung der PMD-Technologie erstellt. Im Falle einer positiven Begutachtung und Förderung beider Projekte sind die Antragsteller an einer offenen und kooperativen Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe von Prof. Wörn interessiert.

Im Rahmen der BMBF-Leitinnovation *Schlüsselkomponenten für die Service Robotik* wurde vom ZESS in Zusammenarbeit mit den Firmen PMD Technologies GmbH und ifm electronic die Projektskizze *HiCam3* formuliert und eingereicht. Als Ergebnis der Skizzenbegutachtung erhalten die Antragsteller die Möglichkeit, einen gemeinsamen BMBF-Antrag zu formulieren. Geplanter Gegenstand dieses Antrags ist neben der infrastrukturellen Ausstattung zum Aufbau eines Mess- und Kalibrierplatzes die industriennahe Bearbeitung von Teilespekten der PMD-Technologie und Systemtechnik.

## Literatur

- [1] M. Levoy, K. Pulli, B. Curless, S. Rusinkiewicz, D. Koller, L. Pereira, M. Ginzton, S. Anderson, J. Davis, J. Ginsberg, J. Shade, and D. Fulk. The digital michelangelo project: 3D scanning of large statues. In *ACM Proceedings SIGGRAPH*, pages 131–144, 2000.
- [2] Sick AG. Laser scanner and safety camera system. [www.sick.com/de/products/categories/safety/espe/-laserscanner/en.html](http://www.sick.com/de/products/categories/safety/espe/-laserscanner/en.html), 2005.
- [3] ViALUX GmbH. 3D machine vision. [www.vialux.de/dgc.htm](http://www.vialux.de/dgc.htm), 2005.
- [4] ABW GmbH. Optische 3D-Formerfassung mit Codiertem Lichtansatz plus Phasenmessung. [www.abw-3d.de/messverfahren/messverfahren\\_de.php](http://www.abw-3d.de/messverfahren/messverfahren_de.php), 2005.
- [5] Y. Ma, S. Stoatto, J. Kosecka, and S. Sastry. *An invitation to 3D vision*. Springer, 2004.
- [6] 3Q. QloneratorPRO. [www.3q.com/offering\\_prod.htm](http://www.3q.com/offering_prod.htm), 2005.
- [7] 3DV Systems. ZCam. [www.3dvsystems.com/products/zcam.html](http://www.3dvsystems.com/products/zcam.html), 2005.
- [8] 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. In *OPTO*, 2004.
- [9] R. Schwarte, Z. Zhang, and B. Buxbaum. Neue 3D-Bildsensoren für das Technische 3D-Sehen. VDE Kongress „Ambient Intelligence“, 18–20 Oktober 2004.
- [10] R. Lange. *3D time-of-flight distance measurement with custom solid-state image sensors in CMOS/CCD-technology*. PhD thesis, University of Siegen, 2000.
- [11] Z. Xu, R. Schwarte, H. Heinol, B. Buxbaum, and T. Ringbeck. Smart pixel – photonic mixer device (PMD). Technical report, PMD-Technologies Siegen, 1999.
- [12] PMD-Technologies. PMD vision 19k. [www.pmdtec.com/inhalt/produkte/documents/PMDvision19k.pdf](http://www.pmdtec.com/inhalt/produkte/documents/PMDvision19k.pdf), 2005.
- [13] CSEM Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique (CSEM). Swiss Ranger SR-2. [www.swissranger.ch](http://www.swissranger.ch), 2005.
- [14] Canesta Inc. CanestaVision EP Development Kit. [www.canesta.com/devkit.htm](http://www.canesta.com/devkit.htm), 2005.

## 4 Unterschriften

---

### 4 Unterschriften

(Prof. Dr. Andreas Kolb)

(Prof. Dr. habil. Otmar Loffeld)

(Prof. Dr. Peter Haring Bolivar)

(Prof. Dr. Reinhard Koch)

(Prof. Dr. Klaus-Dieter Kuhnert)

(Prof. Dr. Hartmut Roskos)

(Prof. Dr. Hubert Roth)

(Prof. Dr. Rudolf Schwarte)

(Dr. Christof Rezk-Salama)

(Dr. Torsten Löffler)