

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



Prof. Dr.-Ing.
Andreas Kolb

Zentrum für Sensorsysteme (ZESS)
und
Lehrstuhl für
Computergraphik und
Multimediasysteme

Universität Siegen
Hölderlinstr. 3
57068 Siegen



Prof. Dr.-Ing. habil.
Otmar Löffeld

Zentrum für Sensorsysteme (ZESS)

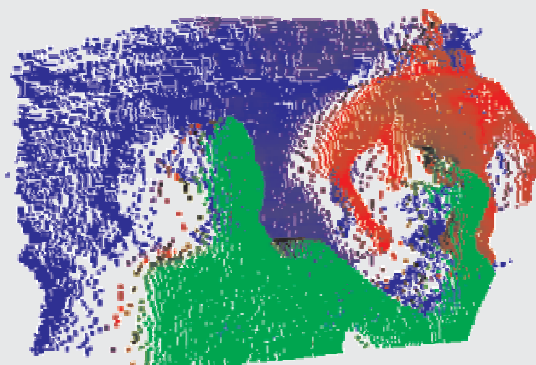
Universität Siegen
Paul-Bonatz-Str. 9-11
57068 Siegen

Antragspaket *Dynamisches 3D Sehen*

Prof. Dr.-Ing.
Andreas Kolb

Zentrum für
Sensorsysteme
(ZESS)

Universität Siegen
Hölderlinstr. 3
57068 Siegen



Prof. Dr.-Ing. habil.
Otmar Löffeld

Zentrum für
Sensorsysteme
(ZESS)

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

Inhaltsverzeichnis

1	Allgemeine Angaben	1
1.1	Antragsteller	1
1.2	Thema	1
1.3	Kennwort	1
1.4	Fachgebiet und Arbeitsrichtung	1
1.5	Voraussichtliche Gesamtdauer	2
1.6	Antragszeitraum	2
1.7	Gewünschter Beginn der Förderung	2
1.8	Zusammenfassung	2
2	Stand der Forschung, eigene Vorarbeiten	2
2.1	Stand der Forschung	3
2.1.1	Kalibrierung von 2D-Kameras	3
2.1.2	Koregistrierung multiokularer, multimodaler und multivariater Bilder	4
2.1.3	Registrierung und Kalibrierung von 2D-Kameras mit 3D-Laserscandaten	5
2.1.4	2D/3D Datenverfeinerung	5
2.1.5	Datenstrukturen für multiokulare Kameraaufbauten	6
2.2	Eigene Vorarbeiten	9
2.2.1	Vorarbeiten im PMD-Kontext	9
2.2.2	Vorarbeiten in problemnahen Themenbereichen	10
3	Ziele und Arbeitsprogramm	15
3.1	Ziele	16
3.2	Arbeitsprogramm	17
3.2.1	Untersuchung des PMD-Bildgebungsprozesses	17
3.2.2	Kalibrierung	19
3.2.3	Koregistrierung für dynamische Kamerapositionen	20
3.2.4	Fusion, lokale Verfeinerung und Speicherung 2D/3D-Daten	21
3.2.5	Zeitliche Einordnung der Aufgaben	22
3.3	Untersuchungen am Menschen	23
3.4	Tierversuche	23
3.5	Gentechnologische Experimente	23
4	Beantragte Mittel	23
4.1	Personalkosten	23
4.2	Wissenschaftliche Geräte	24
4.3	Verbrauchsmaterial	24
4.4	Reisen	25
4.5	Publikationskosten	25
4.6	Sonstige Kosten	25
5	Voraussetzung für die Durchführung des Vorhabens	25
5.1	Zusammensetzung der Arbeitsgruppe	27
5.2	Zusammenarbeit mit anderen Wissenschaftlern	27
5.3	Arbeiten im Ausland und Kooperation mit ausländischen Partnern	28

5.4	Apparative Ausstattung	28
5.5	Laufende Mittel für Sachausgaben	28
5.6	Sonstige Voraussetzungen	29
6	Erklärungen	29
6.1	Max-Planck-Institut	29
7	Unterschriften	
8	Verzeichnis der Anlagen	

1 Allgemeine Angaben

Antrag auf Gewährung einer Sachbeihilfe
Neuantrag

1.1 Antragsteller

Andreas Kolb, Dr.-Ing.
Universitätsprofessor, Projektbereichsleiter
Zentrum für Sensorsysteme (ZESS) und
Lehrstuhl für Computergraphik und Multimediasysteme
geb. 04.06.1965, Deutscher

Dienstadresse:
Universität Siegen
Hölderlinstr.3
57068 Siegen
Tel.: 0271 / 740 - 2404

Privatadresse:
Meilerstr. 76
57074 Siegen
Tel.: 0271 / 741 - 1950

Otmar Loffeld, Dr.-Ing. habil.
Universitätsprofessor, Projektbereichsleiter
Zentrum für Sensorsysteme (ZESS), Projektbereich 2, und
Institut für Nachrichtenverarbeitung
geb. 01.06.1955, Deutscher

Dienstadresse:
Universität Siegen
Paul-Bonatz-Str. 9-11
57068 Siegen
Tel. : 0271/740-3125

Privatadresse:
Nassauer Straße 21
57234 Wilnsdorf
Tel.: 02737 / 2299936
Mobil: 0179 / 202 999 6

1.2 Thema

2D/3D Datenverarbeitung und -fusion auf Basis der PMD-Technologie

1.3 Kennwort

2D3DProc

1.4 Fachgebiet und Arbeitsrichtung

Informatik, Informationsverarbeitung, Signalverarbeitung, Bildverarbeitung, Datenstrukturen, Senordatenverarbeitung, Senorfusion

1.5 Voraussichtliche Gesamtdauer

4 Jahre

1.6 Antragszeitraum

24 Monate

1.7 Gewünschter Beginn der Förderung

01.01.2006

1.8 Zusammenfassung

Im Rahmen des Antragspaketes *Dynamisches 3D-Sehen* fokussiert sich dieser Projektantrag auf die sensornahe Datenverarbeitung. Aus Verarbeitungssicht liefern die verschiedenen 2D/3D-Kamerakombinationen die Daten, die in diesem Teilprojekt verarbeitet werden. (Teil-)Ergebnisse dieses Projektes werden unmittelbar in andere Teilprojekte, insbesondere in *PMDLumi* und *3D-PoseMap* transferiert. Die Unabhängigkeit der Teilprojekte wird durch bereits existierende Kameraaufbauten und Simulatoren gesichert.

Ein Schwerpunkt des Projektes ist die Kalibrierung von 3D-PMD-Kameras und von 2D/3D-Kamerakombinationen. Hierbei sind unterschiedliche Ursachen von Verzerrungen der Sensordaten zu untersuchen, zu modellieren und effizient zu korrigieren um eine interaktive Verarbeitung der Sensordaten zu ermöglichen. Es kommen statische und dynamische, mono- und multiokulare Sensoraufbauten zum Einsatz, die zudem unterschiedliche räumliche Auflösungen aufweisen. Entsprechend werden effiziente Datenstrukturen und Algorithmen zum transparenten Zugriff auf die Daten in diesem Teilprojekt erforscht. Im Falle örtlich dynamischer Sensoraufbauten spielt zudem die Koregistrierung verschiedener, in sich statischer Kamera-kombinationen eine wichtige Rolle.

2 Stand der Forschung, eigene Vorarbeiten

Das Grundprinzip der Tiefenmessung mit dem *Photonic Mixing Device (PMD)*, sowie die Abgrenzung dieser Technologie zu anderen Entfernungsmesstechniken, wird hier nicht weiter erläutert. Der Leser wird auf die Ausführungen in der Präambel zu dem Antragspaket *Dynamisches 3D-Sehen* und auf die Literatur verwiesen [1, 2]. Nachfolgend wird nur auf die relevanten Aspekte der Bildgebung und -verarbeitung für dieses Teilprojekt eingegangen.

2.1 Stand der Forschung

Erstmals stehen mit den PMD-Kameras kompakte und preisgünstige Sensoren zur Verfügung, die in hoher zeitlicher Auflösung ($> 10 \text{ FPS}^1$) und in relativ hoher räumlicher Auflösung ($120 \times 160 \text{ Pixel}$) Tiefendaten erfassen. In Kombination mit bewährter 2D-Kameratechnik in hoher Auflösung (mindestens VGA $480 \times 640 \text{ Pixel}$), eröffnet dies einen völlig neuen Forschungshorizont zu dem es bislang keine nennenswerten Forschungsergebnisse gibt. Entsprechend werden zum Stand der Forschung Themen besprochen, die als Grundbausteine für die im Rahmen dieses Teilprojektes avisierten Zielsetzungen dienen (siehe Abschnitt 3.1).

2.1.1 Kalibrierung von 2D-Kameras

Die Kalibrierung einer 2D-Kamera ermöglicht auf der Basis eines einfachen *Lochkamera-modells* den direkten Bezug zwischen den Pixeln der Bildmatrix und 3D-Strahlen im Raum. Hierbei modellieren *intrinsische Kameraparameter* Verzerrungsfehler, die i.w. auf zwei Ursachen beruhen [3, 4]:

Lineare Verzerrung aufgrund von Mittelpunktverschiebung, nicht-quadratischer Pixelgeometrie und Bildscherung

Nichtlineare Verzerrung durch die Brechungseigenschaften der Kameraoptik, insbesondere bei Verwendung von Weitwinkelobjektiven

In einer konkreten Abbildung zwischen Objekt- in Kamerapixel-Koordinaten sind zudem die Parameter einer Starrkörper-Transformation, die so genannten *extrinsischen Parameter*, zu berücksichtigen.

Die linearen intrinsischen Parameter werden mit einer projektiven 3×3 -Matrix beschrieben. Die nichtlinearen intrinsischen Parameter beruhen auf unterschiedlichen Modellen. Für optische 2D-Kameras wird die radialsymmetrische Verzerrung mittels eines *Polynoms vierten Grades* beschrieben [3, 4], für andere bildgebenden Verfahren wird auf allgemeinere Modelle, z.B. *Freiformdeformationen* zurückgegriffen [6].

Zur Ermittlung der intrinsischen Parameter werden im wesentlichen zwei Arten von Algorithmen eingesetzt:

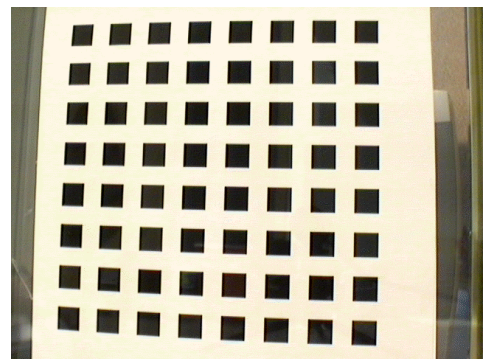


Abbildung 1: Kalibrierungsmuster für 2D-Kameras aus [5].

Photogrammetrische Kalibrierung: Hierbei wird mit der Kamera ein *3D-Kalibriermuster* erfasst, dessen bekannte Textur mit einfachen Bildverarbeitungsoperatoren identifiziert werden kann [7, 8, 9]. Neuere Ansätze verwenden mehrere Aufnahmen von 2D-Kalibriermustern aus unterschiedlichen Perspektiven (siehe [3, 5] und Abbildung 1).

¹frames per second – Bilder pro Sekunde

Autokalibrierung: Die Schätzung der intrinsischen Parameter beruht hierbei auf der Beobachtung einer statischen Szene mit einer bewegten Kamera [4, 10] oder mit einem registriertem Multikamerasystem [11].

Im Teilprojekt *MultiCam* ist die Erstellung eines omnidirektionalen Tiefensensor geplant. In dieser Art von Sensoren werden Techniken der optischen Strahlenbrechung mit Reflexionskörpern, z.B. spiegelnde Kegel, erweitert. Um derartige Sensoren zu kalibrieren bedarf es erweiterter Kameramodelle. Geyer und Daniilidis [12] führen hierzu die *katadioptrische projektive Geometrie* ein. Dieses Modell beschreibt die Klasse der zentral-katadioptrischen Sensoren, die trotz zusätzlichem Reflexionskörper nur einen effektiven Augpunkt besitzen.

2.1.2 Koregistrierung multiokularer, multimodaler und multivariater Bilder

Die Koregistrierung von *Bildern oder Mustern* stellt in der angewandten Bildverarbeitung kein neues Thema dar. Zum Einsatz kommen hier üblicherweise korrelative Ansätze oder aber auch informationstheoretisch motivierte Ähnlichkeitsmaße, wie beispielsweise *Mutual Information* [13, 14, 15]. Die meisten der Konzepte sind theoretisch sehr gut durchdrungen. Beispielhafte Einsatzgebiete sind die Medizin [16] und die Verarbeitung von Radardaten [17]. Die multimodale Koregistrierung wurde insbesondere im Kontext medizinischer Anwendungen untersucht [18, 19]. Hierbei wird in der Regel eine semi-automatische Grobregistrierung anhand anatomischer Merkmale mit einer anschließenden Koregistrierung basierend auf Mutual Information durchgeführt.

Problemspezifisch besteht weiterer Bedarf an theoretischer Grundlagenarbeit in Bereich der Koregistrierung. Bislang kaum untersucht ist die Koregistrierung multimodaler, multivariater Daten, wie sie im Kontext des beantragten Projektes vorkommt. Hierbei stammen die Daten von multivariaten Sensoren (RGB bzw. Reflektivität und Tiefe vom PMD-Sensor) und weisen unterschiedliche Auflösungen und unterschiedliches Rauschen auf. Die Unterschiede beziehen sich nicht nur auf die Stärke der Störungen, sondern auch auf die statistischen Eigenschaften der Störungen. Die Koregistrierung solcher Daten erfordert i.a. implizite Interpolationen zum Ausgleich der unterschiedlichen Auflösungen in Verbindung mit robusten und störresistenten Ähnlichkeitsmaßen.

Im Kontext von *Kamera-Netzwerken* befassen sich verschiedene Arbeiten mit der Registrierung der Kameras zu einer beobachteten Szene [20, 21]. Zur notwendigen Bestimmung der Epipolar-Geometrie werden hierbei Silhouetten-basierte Ansätze verwendet (siehe auch Abschnitt 2.1.4)

Alternativ zur Koregistrierung auf Basis von 2D-Datenarrays werden im Falle von Tiefendaten auch *geometriebasierte* Registrierungstechniken eingesetzt. Zur Registrierung von Teilgeometrien eines Objektes oder einer Szene ist der *Iterative Closest Point (ICP)*-Algorithmus sehr weit verbreitet. Hierbei werden im einfachsten Fall zwei sich überlappende Teilgeometrien zueinander über Punktreferenzen und einer Abstandsminimierung positioniert [22, 23]. Für geringe Abstände zwischen den verschiedenen Sensorpositionen bei der Erfassung der Tiefendaten gibt es *echtzeitnahe* Varianten des ICP-Algorithmus [24]. Die Beschleunigung ist auf die effiziente Nutzung der räumlichen Kohärenz zwischen den Teilaufnahmen zurückzuführen. Andere Ansätze verwenden eine parallele Positionierung mehrerer Teilgeometrien

oder statistische Oberflächeninformation zur robusteren Referenzfindung [25].

2.1.3 Registrierung und Kalibrierung von 2D-Kameras mit 3D-Laserscandaten

Im Kontext der Entfernungsmessung mit Laserscanner müssen die Tiefendaten vielfach mit zusätzlicher Farbinformation versehen werden. Einige Arbeiten befassen sich mit der Kalibrierung der 2D-Bilddaten anhand der 3D-Tiefendaten. Hierbei wird von idealen und sehr dichten 3D-Scannerdaten ausgegangen, die im Falle der PMD-Kamera nicht vorliegen.

Stamos und Allen [26] beschreiben einen Ansatz zur Registrierung mehrere Laserrangedatensätze mit 2D-Bilddaten zu einem integrierten 3D-Modell. Hierzu werden aus den Tiefendaten lineare Merkmale extrahiert, die zur Registrierung der Laserrangedaten verwendet werden. Die Kalibrierung der 2D-Kamera erfolgt durch manuelle Auswahl korrespondierender Merkmale. Der Algorithmus von Dias et al. [27] verbindet eine semi-automatische Registrierung und eine Kalibrierung von Laserreflexions- mit 2D-Bilddaten. Auf Basis der Schätzung einer 2D affinen Abbildung zwischen den Bildern werden korrespondierende Punktmerkmal in beiden Modalitäten bestimmt. Anhand dieser Merkmale werden mittels der Kalibrierungstechnik von Tsai [8] die intrinsischen Parameter der 2D-Kamera ermittelt. In einer aufbauenden Arbeit integrieren Dias et al. [28] einen photogrammetrischen Ansatz zur Verbesserung der Merkmalsbestimmung und zur Verfeinerung der Tiefeninformation (siehe hierzu auch Abschnitt 2.1.4).

2.1.4 2D/3D Datenverfeinerung

In diesem Abschnitt werden bekannte Ansätze beschrieben, die die lokale Verfeinerung und Korrektur der Tiefeninformation des relativ gering auflösenden PMD-Sensors durch die hochauflösenden 2D-Sensorik unterstützen können.

Eines der klassischen Verfahren zur 3D-Rekonstruktion realer Objekte basiert auf der approximativen Berechnung der *visuellen Hülle* eines Objektes (auch *Shape from Silhouette*) aus kalibrierten und registrierten 2D-Bildersequenzen (siehe [30] und Abschnitt 2.2.2, sowie Abbildung 2). Auf Basis der visuellen Hülle wurden mehrfach kommerzielle Produkte umgesetzt (Beispiel: UZR [31]).

Eine Reihe von Forschungsarbeiten erweitert den Shape from Silhouette Ansatz mit photogrammetrischen Techniken [32, 33, 34]. Die grundsätzliche Vorgehensweise basiert hierbei auf dem Vergleich von Korrespondenzen in den 2D-Bildern, die durch die Lage entsprechender Punkte auf der visuellen Hülle gegeben sind.

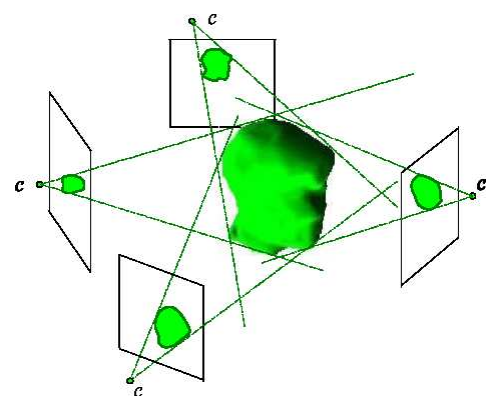


Abbildung 2: Das Shape from Silhouette Verfahren nach [29].

Bildbasierte Repräsentationen der visuellen Hülle bilden die Basis für eine effiziente Bild-

synthese für virtuelle Kamerapositionen [35, 32]. Die visuelle Hülle wird hierbei erst bei der Bildsynthese auf Basis der Objekt-Silhouetten in den registrierten 2D-Bilder rekonstruiert.

Hernández Esteban und Schmitt [33] verwenden einen deformierbares *3D-Snakes-Modell* [36] zur Beschreibung der visuellen Hülle. Der zugrundeliegende Optimierungsansatz minimiert simultan den Lagefehler der Punkte zu den Konturen und die Abweichungen in der lokalen Textur in den Projektionen.

Eine der verbreitetsten Techniken zur expliziten Berechnung der visuellen Hülle basiert auf einem Volumenmodell (*Volume Carving* oder *Volumenrückschnitt*) mit anschließender Polygonalisierung [37]. Kuzu und Sinram [34] verfeinern das Volume-Carving, indem sie die Voxel auf der Oberfläche der visuellen Hülle auf Farbkorrespondenz prüfen und ggf. als nicht zum Objektvolumen gehörend verwerfen. Damit werden Voxel in lokalen Konkavitäten, die zwar zur visuellen Hülle, nicht aber zum Objekt selbst gehören, entfernt. Alternativ zum Volume-Carving bestimmen Matusik et al. [38] die exakte visuelle Hülle anhand der 2D-Silhouetten unter Verwendung der projektiven Abbildungen zwischen den 3D-Kamera-Koordinaten.

Tosovic et al. [39] beschreiben eine Kombination von 3D-Messverfahren auf Basis von *strukturiertem Licht* und der *visuellen Hülle*. Hierbei wird ein hierarchische Volumenmodell (Oc-tree), welches der Volumenrückschnitt liefert, um die Daten aus dem Ansatz mit strukturiertem Licht ergänzt. Die grundsätzliche Fragestellung hat starke Ähnlichkeit mit der in diesem Projekt geplanten lokalen Modellverfeinerung (siehe Abschnitt 3.1). Der verwendete Lösungsansatz auf Basis eines Volumenmodelles ist jedoch zu rechenaufwendig und damit tendenziell ungeeignet.

2.1.5 Datenstrukturen für multiokulare Kameraaufbauten

Die Aufnahme von statische Szenen mit einer bewegten, passiven Kamera oder, äquivalent, die Aufnahme mit multiokulare Kameraaufbauten, wird seit vielen Jahre intensiv erforscht (siehe auch Teilprojekte *PMDLumi* und *3D-PoseMap*). Im Kontext der Lichtfeldrekonstruktion [40], der Lumigraph-Darstellung [41] und der plenoptischen Modellierung [42, 43] kommen entsprechende Aufbauten bestehend aus 2D-Kameras zum Einsatz.

Im Rahmen der genannten Forschungsthemen wurden verschiedene Verfahren zur Speicherung der entsprechenden Daten erarbeitet. Lichtfelder sind 4D-Funktionen, die häufig über zwei parallele Ebene parametrisiert werden. Dieser Ansatz kann räumliche nur eingeschränkt genutzt werden. Für Blickrichtungen nahezu parallel zu den Ebenen ist die Ortsauflösung sehr gering. Entsprechend können mehrere Ebenenpaare in Form eines Würfels eingesetzt werden [41]. Alternativ werden auch Kugelparametrisierung verwendet [44]. Beim Lumigraph kommen zusätzliche Tiefeninformationen hinzu, die Parametrisierungen entsprechen denjenigen der Lichtfeldansätze. Die grundsätzliche Herausforderung liegt in der *interaktiven Datenintegration* und in dem *effizienten Datenzugriff* für die gewählte Darstellung. Insbesondere die Datenintegration ist bei vorgenannten Ansätzen sehr aufwendig, da vielfaches Resampling der Eingangsdaten erforderlich ist.

Buehler et al. [45] verwenden eine Darstellung auf Basis der „Rohdaten“, d.h. der aufgenommenen 2D-Bilddaten, unter Einbeziehung der affinen Abbildungen zwischen den einzelnen Aufnahmepositionen (*unstructured lumigraph*). Dieser Ansatz verbindet die *image-based*

texturing-Technik von Debevec et al. [46, 47] mit den vorgenannten regulären Datenrepräsentationen. Der konkrete Ansatz synthetisiert Bilder für virtuelle Kamerapositionen unter Einbeziehung lokal variabler Auflösungen aufgrund unterschiedlicher Objekt-Kamera Abstände und Ausrichtungen bei der Aufnahme der Daten. Ein effizienter Datenzugriff für unkohärente Strahlen ist beim unstrukturierten Lumigraph schwer zu realisieren.

Literatur zum Stand der Forschung

- [1] 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.
- [2] R. Schwarte, Z. Zhang, and B. Buxbaum. Neue 3D-Bildsensoren für das Technische 3D-Sehen. VDE Kongress „Ambient Intelligence“, 18–20 Oktober 2004.
- [3] Human Interface Technology Lab, University of Washington. ARToolKit. www.hitl.washington.edu/research/artoolkit, 2005.
- [4] Y. Ma, S. Statto, J. Kosecka, and S. Sastry. *An invitation to 3D vision*. Springer, 2004.
- [5] Z. Zhang. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(11):1330–1334, 2000.
- [6] A. Kolb. Bildentzerrung in der Strahlentherapie. Projekt-Dokumentation Fa. positronic beam service GmbH, Rellingen, 2002.
- [7] D. Brown. Close-range camera calibration. *Photogrammetric Engineering*, 37(8):855–866, 1978.
- [8] R. Tsai. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 3(4):323–344, 1987.
- [9] O. Faugeras. *Three-Dimensional Computer Vision: a Geometric Viewpoint*. MIT Press, 1993.
- [10] Q. Luong and O. Faugeras. Self-calibration of a moving camera from point correspondences and fundamental matrices. *J. of Computer Vision*, 22(3):261–289, 1997.
- [11] T. Svoboda, D. Martinec, and T. Pajdla. A convenient multi-camera self-calibration for virtual environments. In *Teleoperators and Virtual Environments*, volume 14:4, 2005. to appear.
- [12] C. Geyer and K. Daniilidis. Catadioptric projective geometry. *J. of Computer Vision*, 43:223–243, 2001.
- [13] A. Collignon, D. Vandermeulen, P. Suetens, and G. Marchal. Automated multi-modality image registration based on information theory. *Kluwer Acad. Publ's: Computational Imaging and Vision*, 3:263–274, 1995.
- [14] B. Zitova and J. Flusser. Image registration methods: a survey. *Image and Vision Computing*, 21:977–1000, 2003.
- [15] A. Cole-Rhodes, K. Johnson, and J. LeMoigne and I. Zavorin. Multiresolution registration of remote sensing imagery by optimization of mutual information using a stochastic gradient. *IEEE transaction on Image Processing*, 12(12):1495–1511, 2003.
- [16] R. Woods, J. Mazziotta, and S. Cherry. MRI-PET registration with automated algorithm. *Journal of Computer Assisted Tomography*, 17(4):536–546, 1993.
- [17] J. Mittermaier. *Hochauflösende Verarbeitung von Radardaten mit synthetischer Apertur*. PhD thesis, Universität Siegen – Zentrum f. Sensorsysteme, 2000.
- [18] L. Brown. A survey of image registration techniques. *ACM Computing Surveys*, 24(4):325–376, 1992.
- [19] A. Maintz and M. Viergever. A survey of medical image registration. *Medical Image Analysis*, 2(1):1–66, 1998.
- [20] S. Sinha, M. Pollefeys, and L. McMillan. Camera network calibration from dynamic silhouettes. In *IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 195–202, 2004.
- [21] S. Sinha and M. Pollefeys. Synchronization and calibration of a camera network for 3D event reconstruction from live video. In *IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, page 1196, 2004.
- [22] Y. Chen and G.G. Medioni. Object modeling by registration of multiple range images. *J. Image and Vision Computing*, 10(3):145–155, 1992.

- [23] Z. Zhang. Iterative point matching for registration of free-from curves and surfaces. *J. of Computer Vision*, 13(2):119–152, 1994.
- [24] S. Rusinkiewicz, O. Hall-Holt, and M. Levoy. Real-time 3D model acquisition. In *ACM Proceedings SIGGRAPH*, pages 438–446, 2002.
- [25] P. Biber, S. Fleck, and W. Straßer. A probabilistic framework for robust and accurate matching of point clouds. In *26th Pattern Recognition Symposium (DAGM)*, 2004.
- [26] I. Stamos and P. Allen. 3D model construction using range and image data. In *IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 531–536, 2000.
- [27] P. Dias, V. Sequeira, J. Goncalves, and F. Vaz. Automatic registration of laser reflectance and colour intensity images for 3D reconstruction. *Robotics and Autonomous Systems*, 39:157–168, 2002.
- [28] P. Dias, V. Sequeira, F. Vaz, and J. Goncalves. Registration and fusion of intensity and range data for 3D modelling of real world scenes. In *Proc. 3D Digital Imaging and Modeling*, pages 418–425, 2003.
- [29] K. Cheung. Visual hull construction, alignment and refinement across time. Technical report, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, 2002. Thesis Proposal.
- [30] A. Laurentini. The visual hull concept for silhouette-based image understanding. *IEEE Trans. Pattern Anal. and Mach. Intell.*, 16(2):150–162, 1994.
- [31] UZR. iModeller 3D Version 2.5. www.uzr.de, 2005.
- [32] Y. Liu, G. Chen, N. Max, C. Hofsetz, and P. McGuinness. Visual hull rendering with multi-view stereo refinement. In *Proc. Conf. on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision (WSCG)*, pages 261–268, 2004.
- [33] C. Hernández Esteban and F. Schmitt. Silhouette and stereo fusion for 3D object modeling. *J. Comp. Vision and Image Understanding*, 96(3):367–392, 2004. Special issue on Model-based and Image-based 3D Scene Representation for Interactive Visualization.
- [34] Y. Kuzu and O. Sinram. Volumetric model refinement by shell carving. In *Prof. XXth ISPRS Congress*, pages 128–153, 2004.
- [35] W. Matusik, C. Buehler, R. Raskar, S. Gortler, and L. McMillan. Image-based visual hulls. In *ACM Proceedings SIGGRAPH*, pages 369–374, 2000.
- [36] M. Kass, A. Witkin, and D. Terzopoulos. Snakes - active contour models. *J. of Computer Vision*, 1(4):321–331, 1987.
- [37] William E. Lorensen and Harvey E. Cline. Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm. In *ACM Proceedings SIGGRAPH*, volume 21, pages 163–169. ACM, 1987.
- [38] W. Matusik, C. Buehler, and L. McMillan. Polyhedral visual hulls for real-time rendering. In *Eurographics Workshop on Rendering*, pages 115–126, 2001.
- [39] S. Tosovic, R. Sablatnig, and M. Kampel. On combining shape from silhouette and shape from structured light. In H. Wildenauer and W. Kropatsch, editors, *Proc. of 7th Computer Vision Winter Workshop*, pages 108–118, 2002.
- [40] M. Levoy and P. Hanrahan. Lightfield rendering. In *ACM Proceedings SIGGRAPH*, pages 31–42, 1996.
- [41] S. Gortler, R. Grzeszczuk, R. Szeliski, and M. Cohen. The lumigraph. In *ACM Proceedings SIGGRAPH*, pages 43–54, 1996.
- [42] L. McMillan and G. Bishop. Plenoptic modeling: An image-based rendering system. In *ACM Proceedings SIGGRAPH*, pages 39–46, 1995.
- [43] M. Pollefeys, L. Van Gool, M. Vergauwen, F. Verbiest, K. Cornelis, J. Tops, and R. Koch. Visual modeling with a hand-held camera. *J. of Computer Vision*, 59(3):207–232, 2004.
- [44] I. Ihm, S. Park, , and R. Lee. Rendering of spherical light fields. In *Proc. Pacific Graphics*, page 59, 1997.
- [45] C. Buehler, M. Bosse, L. McMillan, S. Gortler, and M. Cohen. Unstructured lumigraph rendering. In *ACM Proceedings SIGGRAPH*, pages 425–432, 2001.
- [46] P. Debevec, C. Taylor, and J. Malik. Modeling and rendering architecture from photographs. In *ACM Proceedings SIGGRAPH*, pages 11–20, 1996.
- [47] P. Debevec, Y. Yu, and G. Borshukov. Efficient view-dependent image-based rendering with projective texture-mapping. In *Eurographics Workshop on Rendering*, pages 105–116, 1998.

2.2 Eigene Vorarbeiten

Prof. Kolb ist seit ca. 13 Jahren im Bereich der Computergraphik aktiv. Aktuell ist er Leiter des Lehrstuhls für Computergraphik und Multimediasysteme und baut den Projektbereich *Visualisierung, Computergraphik und Bildverarbeitung* am ZESS auf. Der Lehrstuhl für Computergraphik und Multimediasysteme wurde im Jahre 2003 an der Universität Siegen neu eingerichtet.

Prof. Löffeld arbeitet seit 1986 auf dem Gebiet der modellgestützten optimalen Signalverarbeitung, insbesondere der Synthetic Aperture Radar (SAR) Bildverarbeitung und der Koregistrierung deformierter und rauschüberlagerter Bilder. Er leitet den Projektbereich 2 des ZESS *Optimale Multi Sensor Datenfusion, Remote Sensing - SAR*, ist stellvertretender Vorsitzender des ZESS und Sprecher des International Postgraduate Programmes *Multi Sensorics*.

2.2.1 Vorarbeiten im PMD-Kontext

Eine Reihe von aktuellen Aktivitäten beziehen direkt die PMD-Technologie ein. Da es sich größtenteils um laufende Arbeiten handelt, liegen nicht überall Veröffentlichungen im üblichen Umfang vor.

PMD-Sensorentwicklung

Das ZESS entwickelt in Zusammenarbeit mit der ausgegründeten Firma *PMD-Technologies* und in Kooperation mit einer Halbleiter-FAB² PMD-Matrix-Sensoren mit variabler Geometrie. Das ZESS entwickelt die Schaltungstechnologie zur Ansteuerung und Informationsverarbeitung der PMD-Matrix-Sensoren.

Darüber hinaus wurden erste 2D/3D-Kamerakombinationen aufgebaut und getestet. Für einen statisch binokularen 2D/3D-Kameraaufbau mit fester relativer Lage der Kameras wurden erste Tests zur 2D-bildbasierten Kalibrierung unter Einsatz von ARToolKit [1] durchgeführt. Erste Ergebnisse zeigen, dass mit diesem Ansatz eine einfache, entkoppelte Kalibrierung multiokularer 2D/3D-Aufbauten relativ zu einem bekannten Marker im 3D-Raum möglich ist. Es ist zu erwähnen, dass mit diesem Ansatz zunächst die intrinsischen Kameraparameter in der Bildebene und zusätzliche Tiefendaten bzgl. der 3D-Position des Markers ermittelt werden. Die Modellierung und Erfassung der intrinsischen Tiefenparameter ist Teil des Projektantrags *2D3DProc*.

PMD Simulation und synthetische PMD-Daten

Im Rahmen einer Industriekooperation wurde ein Simulator zum Einsatz des PMD in einer Bewegtoobjektsituation im Hinblick auf ein Fahrerassistenzsystem entwickelt. Dieser Simulator wurde mit Matlab umgesetzt und weist eine hohe Genauigkeit auf.

²Fertigungslinie für die Chipherstellung

Zudem wurde ein einfacher, echtzeitfähiger Simulator unter Verwendung von Standardtechniken der Bildsynthese (OpenGL und C++) entwickelt. Dieser Simulator erzeugt kombinierte 2D/3D Daten zunächst für monokulare Aufbauten und für beliebige, separate 2D- und 3D-Auflösung. Spezifische Sensorfehler, wie z.B. Rauschen, Beugungen oder Laufzeitverzerrungen werden derzeit nicht berücksichtigt.

Verarbeitung von PMD-Daten

Das erste interaktive Visualisierungswerkzeug für die zeitlich hochaufgelösten PMD-Daten wurde in einer Diplomarbeit bei der Firma PMD-Technologies unter Betreuung von Prof. Kolb entwickelt [2, 3]. In das Visualisierungswerkzeug wurden einfache Filtertechniken zur Rauschunterdrückung und Tiefensegmentierung integriert.

Aufbauend fand eine weiterführende Untersuchung zur Umwandlung der PMD-Sensor- in Tiefenmessdaten bzw. kartesische 3D-Daten statt. Diese hat neben einem bekannten, konstanten Tiefenoffset, der durch eine Zeitverschiebung aufgrund der kamerainternen Verarbeitung verursacht wird, eine nicht-lineare, räumliche Verzerrung ergeben. Neueste Untersuchungen deuten darauf hin, dass dieser Effekt im u.a. auf den bistatischen Aufbau des PMD-Sensors zurückzuführen ist (siehe auch Abschnitt 3.2.1).

Basierend auf einem binokularen 2D/3D-Kameraaufbau wurden erste Tests zur interaktiven Erfassung registrierter 2D/3D-Daten durchgeführt [4]. Hierbei wurde neben der Echtzeit-Erfassung auch eine Echtzeit-Bildverarbeitung und -synthese auf dem *Graphik-Prozessor (GPU)* umgesetzt die im weiteren Grundlage für die Untersuchungen im Bereich der Lichtfeldrekonstruktion und -synthese sein werden (siehe Teilprojekt PMDLumi).

2.2.2 Vorarbeiten in problemnahen Themenbereichen

Beide Antragsteller und deren Arbeitsgruppen haben langjährige Erfahrung in einer Vielzahl von Themenfelder, die für die Bearbeitung des beantragten Teilprojektes von großer Bedeutung sind. Im folgenden werden wesentliche Ergebnisse kurz dargestellt.

Sensorik zur Entfernungsmessung

Im Rahmen verschiedener, öffentlich geförderter Forschungsarbeiten wurden am ZESS Techniken zur sensoruellen Erfassung von Entfernungsdaten erforscht [5, 6, 7, 8]. Erste Arbeiten hierzu gehen auf das Jahr 1986 zurück und sind unter [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17] dokumentiert.



Abbildung 3: Grauwertbild (links) und Tiefenbild (rechts) des 3D-Messsystems des ZESS

Ein im ZESS entwickelten Multisensorkonzept bietet die Möglichkeit, 3D-Objekte flexi-

bel auf eine Entfernung bis ca. 10 m zu vermessen [18]. Hierbei wurde ein Laserradar-Entfernungsmesssystem mittels eines 2D-Spiegelscanners zu einem 3D-Messsystem erweitert. Eine zusätzliche 2D-Bildkamera erfasst und analysiert die zu vermessende Szene (siehe Abbildung 3).

Neben der Erzeugung von 3D-Daten wurde die Problematik der Fusionierung von 2D-Intensitätsbildern mit den 3D-Laserscannerdaten bearbeitet. Mit der Fusionierung konnte eine adaptive Laserstrahlführung realisiert werden, um nur die relevanten Teile des Sichtfeldes abzutasten [19, 20, 21, 22, 23].

Tiefendaten auf Basis von 2D-Kameras

Zwei grundlegende Ansätze zur Tiefenmessung wurden in Forschungsprojekten untersucht, die auf *strukturiertem Licht* bzw. auf der *visuellen Hülle* eines Objektes basieren (siehe auch Abschnitt 2.1.4 und die Präamble des Antragspaketes).

Der verwendete Ansatz zur Erfassung von Tiefendaten mit strukturiertem Licht basiert auf farbkodierter Beleuchtung unter Einsatz des Phasen-Shift-Verfahrens in einzelnen R-,G-,B-Kanälen. Die Phasenverschiebung bezeichnet hierbei den Versatz zwischen den einzelnen Farbkomponenten der strukturierten Farbbeleuchtung. Die Eindeutigkeit erfolgt über mehrere Beleuchtungsperioden mit linear ansteigender Farbsättigung. Das Verfahren ermöglicht eine schnelle Erfassung von 3D-Daten, die auch dynamisch sein können [28]. Das unterschiedliche Rückstreuverhalten einzelner Objektoberflächen ist bei diesem Ansatz eine große Herausforderung. Zudem ist zu bemerken, dass die Umrechnung der 2D-Bild- in 3D-Tiefendaten nicht interaktiv erfolgt.

Im Rahmen des BMBF-Projektes *Reparatur und Texturierung von Polygonmodellen für Virtual Reality Anwendungen* [34] wurde ein Shape from Silhouette Verfahren zur Erfassung und Integration realer Objekte in virtuelle Szenen umgesetzt. Das Verfahren kombiniert eine markerbasierte 2D Bildregistrierung mit einer teilautomatischen Bildsegmentierung zur Erkennung der Objektsilhouetten.

Im Kontext der Erfassung von Tiefendaten aus 2D-Bilddaten sei auch ein Industrieprojekt mit der Firma Bosch erwähnt. In diesem Projekt wurden Methoden der Stereo-Bildverarbeitung zur Bauteilerkennung und Vollständigkeitsprüfung von Vergasern untersucht [35].

Koregistrierung und Fusion multimodaler 2D- und 3D-Bilddaten

Die eigenen Vorarbeiten und Erfahrungen zur Koregistrierung stammen aus zahlreichen von ESA und BMBF geförderten, interferometrischen Synthetic Aperture Radar (SAR) Vorhaben (ERS1/ERS2-Tandem-Interferometric Mission, Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)), sowie aus industriellen Forschungsvorhaben (Dornier, Astrium/EADS). Die Koregistrierung von hochaufgelösten SAR-Bildern und optischen Bildern ist ein aktuelles Forschungsthema des International Postgraduate Programme (IPP) Multi Sensorics am ZESS [36, 37, 38, 39]. Hierbei werden Verfahren zur Koregistrierung von multivariaten

Pixelinhalten für multimodale Daten erforscht. Die Untersuchungen konzentrierten sich insbesondere auf die Einflüsse von multiplikativem (Speckle) und additivem Störuschen. Unter anderem wurde in Form der *Alignability* ein neuartiges Kriterium gefunden, mit welchem die passpunktfreie Koregistrierung multimodaler Szenen effizient durchgeführt werden kann.

Für die Fusion mono- und multimodaler 3D-Bilddaten wurden echtzeitfähige, nichtlineare Deformationsmodelle entwickelt um eine dynamische Verformung der aufgenommenen Objekte zu berücksichtigen [40, 41]. Darüber hinaus wurden Algorithmen zur beschleunigten Berechnung entropie-basierter Ähnlichkeitsmaße (Mutual Information) für die Koregistrierung multimodaler Volumendaten erarbeitet. Hoher Rechenaufwand entsteht hierbei vor allem bei der Schätzung der Verbundwahrscheinlichkeiten (2D Histogramme) zweier überlagerter Datensätze. Um brauchbare Schätzwerte zu erhalten, muss eine große Zahl korrespondierender Bildpunkte untersucht werden. Der Einsatz der Verfahren zur Registrierung und Bildfusion wurde in klinischen Studien [42] zur Berücksichtigung des *Brain-Shifts* bei Gehirnoperationen [43] evaluiert.

Echtzeit-Bildverarbeitung in der Medizin

Bei der Umsetzung von Visualisierungsprojekten in unterschiedlichen Anwendungsfeldern spielen 2D- und 3D-Bildverarbeitungstechniken eine wichtige Rolle.

Beispielhaft wurden Techniken erarbeitet, die die Vorteile von expliziter und impliziter Segmentierung kombinieren um bestimmte Zielvolumina effizient zu visualisieren (z.B. Blutgefäßmalformationen und Stenosen im Rückenmarksbereich [44]). Die explizite Segmentierung der Voxeldaten (z.B. durch anisotrope Diffusionsfilter und Grauwert-Morphologie) trennt dabei in einem Offline-Prozess zunächst nur grob die unterschiedlichen anatomischen Strukturen voneinander. Anschließend erfolgt die implizite Segmentierung von Feinstrukturen in Echtzeit über lokal angewandte Transferfunktionen.

In einem Industrieprojekt mit der Firma positronic beam service GmbH [45] wurde ein Verfahren zur Bildentzerrung für Aufnahmen aus der Strahlentherapie erarbeitet. Hierbei wurde ein generisches Deformationsmodell basierend auf Freiformdeformationen verwendet um die nichtlineare Verzerrung des Aufnahmeprozesses zu modellieren und zu korrigieren.

3D Geometrieverarbeitung

Seit vielen Jahren werden Algorithmen zur Verarbeitung von 3D Geometrien von den Antragstellern erforscht. Hierbei wurden Probleme im Kontext der Berechnung optimierter Interpolationsflächen unter Einsatz verschiedener Qualitätsmaße untersucht [46, 47, 48, 49]. Als Qualitätsmaße wurden beispielsweise die *totale Krümmung* oder die *Minimale Krümmungsvariation* eingesetzt. Darüber hinaus wurden Verfahren zur Reparatur von polygonalen Flächen, insbesondere zum Füllen von Löchern und zur Entfernung redundanter Geometrieteile untersucht [50].

Hardwarebeschleunigte Algorithmen

Die Beschleunigung von Algorithmen verschiedenster Anwendungsbereiche unter Einsatz programmierbarer Graphikhardware (*Graphics Processing Unit (GPU)*) ist ein Forschungsschwerpunkt am Lehrstuhl für Computergraphik und Multimediasysteme. Bislang wurden Optimierungsansätze u.a. in den Bereichen Volumenvisualisierung [51, 52, 53], wissenschaftliches Rechnen für Simulationen [54, 55, 56] und Bildsynthese [57, 58] erfolgreich umgesetzt.

Literatur zu den eigenen Vorarbeiten

- [1] Human Interface Technology Lab, University of Washington. ARToolKit. www.hitl.washington.edu/research/artoolkit, 2005.
- [2] M. Profittlich. Entwurf und Implementierung eines Software-Frameworks zur Ansteuerung entfernungsmessender PMD-Kameras und Verarbeitung der gewonnenen Daten. Master's thesis, Universität Siegen/Fachhochschule Wedel, 2004.
- [3] PMDTechnologies. CamVis Pro 2.0: Graphical user interface for 3D cameras. [www.pmdtec.com/inhalt /produkte/documents/CamVisDatenblatt.pdf](http://www.pmdtec.com/inhalt/produkte/documents/CamVisDatenblatt.pdf), 2005.
- [4] S. Todt, C. Rezk-Salama, and A. Kolb. Real-time fusion of range and light field images. SIGGRAPH Poster-Session, 2005.
- [5] O. Löffeld. 3D-Objektvermessung auf größere Entfernungen. BMFT-Verbundprojekt, Fördkz. 13N5882.
- [6] O. Löffeld. Integrierte 2D/3D-Geometrieprüfung und Szenenanalyse. DFG Schwerpunktprogramm: Automatische Sichtprüfung technischer Objekte, 1995-1996. Kennz. Lo455/4-1.
- [7] O. Löffeld. Integrierte 2D/3D-Geometrieprüfung und Szenenanalyse. DFG Schwerpunktprogramm: Automatische Sichtprüfung technischer Objekte, 1996-1998. Kennz. Lo455/4-2/3.
- [8] R. Schwarte. Integrierte 2D/3D-Geometrieprüfung und Szenenanalyse. DFG Schwerpunktprogramm: Automatische Sichtprüfung technischer Objekte. Kennz. SCHW 630/12000.
- [9] Inst. f. Nachrichtentechnik, Univ. Siegen. Laser Diode Rangefinder Demonstration Model, 1985.
- [10] Inst. f. Nachrichtentechnik, Univ. Siegen. Industrielle füllstandsmessung nach dem laserpuls-laufzeitverfahren. Abschlußbericht des Forschungsprojektes im Auftrag der Firma Krohne, Juli 1986. AiF F.u.E.-Projekt 2610.
- [11] R. Schwarte, V. Baumgarten, B. Bundschuh, W. Graf, K. Hartmann, F. Heuten, and O. Löffeld. Implementation of an advanced laser ranging sensor concept. In *Proc. IAF Conference*, Stockholm, 1985.
- [12] R. Schwarte, V. Baumgarten, B. Bundschuh, R. Dänel, W. Graf, K. Hartmann, F. Heuten, and O. Löffeld. A new concept for a precise and versatile laser range finder and optical radar. In *Proc. Laser Conf.*, München, 1987.
- [13] L. Tran Duc and O. Löffeld. Theoretische und experimentelle Untersuchung und Verifikation neuer Meßwertverarbeitungsalgorithmen für die schnelle, dreidimensionale Objekterfassung. Forschungsbericht für die Alfried Krupp von Bohlen und Halbach-Stiftung, 1987.
- [14] R. Schwarte, I. Aller, V. Baumgarten, B. Bundschuh, W. Graf, K. Hartmann, and O. Löffeld. Neuartige Sensorsysteme, Laserradar mit Impulslaufzeitmessung. *Intelligente Sensorsysteme in der Fertigungstechnik*, 1989. Berlin, Springer Verlag.
- [15] R. Schwarte, I. Aller, V. Baumgarten, B. Bundschuh, W. Graf, K. Hartmann, and O. Löffeld. Laserradar mit Impulslaufzeitmessung. In J. Rogos, editor, *Intelligente Sensorsysteme in der Fertigungstechnik*. Springer-Verlag, 1989.
- [16] D. Ley and B. Bundschuh. Methoden der industriellen Bildverarbeitung. Vortrag beim Workshop: Laseroptische und bildgebende Sensorsysteme für die industrielle Messtechnik im Zentrum für Sensorsysteme der Universität Siegen, 1992.
- [17] DFG-Arbeitstreffen. Technisches 3D-Sehen auf der Basis der PMD-Technologie. www.3d-view.org, October 2004.
- [18] J. Weber. *Ein visuell unterstütztes, laseroptisches Multisensorsystem zur automatisierten Erfassung dreidimensionaler Objekte*. PhD thesis, Universität Siegen, 1998.

- [19] D. Ley. *Ein intelligentes Multisensorsystem zur berührungslosen Erfassung dreidimensionaler Konturen*. PhD thesis, Zentrum für Sensorsysteme, Universität-Siegen, 1992.
- [20] D. Ley, J. Klicker, and B. Scheffe. Intelligent multisensor system for high-speed and high-precision 3D metrology. In *Proc. SPIE Vision, Sensors, and Control for Automated Manufacturing Systems*, volume 2063, pages 2–13, 1993.
- [21] D. Justen and K. Hartmann. 3D-image processing through grayscale images and distance data related to individual pixels. In *Proc. SPIE Visual Information Processing*, volume 3716, 1999.
- [22] D. Justen, K. Hartmann, and R. Schwarte. 3D-Bildverarbeitung auf Basis eines Grauwertbildes mit vereinzelter Entfernungsdaten. In *Proc. Optische Formerfassung*, pages 249–258, 1999.
- [23] D. Justen. *Untersuchung eines neuartigen 2D-gestützten 3D-PMD-Bildverarbeitungssystems*. PhD thesis, Universität Siegen, 2001.
- [24] O. Löffeld. *Estimationstheorie I / Grundlagen und stochastische Konzepte*. Oldenbourg Verlag, 1990.
- [25] O. Löffeld. *Estimationstheorie II / Anwendungen - Kalman-Filter*. Oldenbourg Verlag, 1990.
- [26] R. Gerdes. *Dreidimensionales Messen mit einer Videokamera unter Ausnutzung geometrischer Randbedingungen*. PhD thesis, Universität Siegen, 1994.
- [27] J. Li, O. Löffeld, B. Buxbaum, and Z. Xu. Optimization of a laser ranging system in the case of colored noise. *SPIE - Intelligent Robots and Computer Vision XV*, 2904:108–116, 1996.
- [28] E. Schubert. *Mehrfach farbcodierte Triangulationsverfahren zur topometrischen Erfassung und Vermessung von 3D-Objekten*. PhD thesis, Universität Siegen, 1996.
- [29] J. Olk. *Untersuchung von Laufzeitentfernungsmeßsystemen unter besonderer Berücksichtigung des Referenzproblems*, volume 5. Shaker Verlag, 1997.
- [30] R. Otterbach. *Robuste 3D-Objekterkennung und Lagebestimmung durch Auswertung von 2D-Bildfolgen*. PhD thesis, Universität Siegen, 1995.
- [31] R. Schwarte, H. Heinol, Z. Xu, J. Olk, and W. Tai. Schnelle und einfache optische Formerfassung mit einem neuartigen Korrelations-Photodetektor-Array. In *Proc. Optische Formerfassung*, volume 30, pages 199–209, 1997.
- [32] R. Schwarte, H. Heinol, B. Buxbaum, Z. Xu, and T. Ringbeck. Neuartige 3D-Visionsysteme auf der Basis Layout-optimierter PMD-Strukturen. *Technisches Messen*, 65:264–271, 1998.
- [33] Z. Xu, R. Schwarte, H. Heinol, B. Buxbaum, and T. Ringbeck. Smart pixel -photometric mixer device (PMD) / new system concept of a 3D-imaging camera-on-a-chip. In *5th Intern. Conf. on Mechatronics and Machine Vision in Practice*, pages 259–264, 1998.
- [34] A. Kolb. Reparatur und Texturierung von Polygonmodellen für Virtual Reality Anwendungen. <http://vrlab.fh-wedel.de/themen/modellreparatur.html>, 2002-2003. BMBF-gefördert in Rahmen des aFuE-Programms, Förderkennziffer 1706002.
- [35] E. Löcherbach. *Ein Beitrag zur On-line-Entfernungsbestimmung mittels Stereo-Bildauswertung*. PhD thesis, Fachbereich Elektrotechnik, Universität Siegen, 1986.
- [36] A. Amankwah and O. Löffeld. On space and search strategies data in image registration. In *Conf. Proc. Intern. Radar Symposium*, Berlin, 2005.
- [37] A. Amankwah and O. Löffeld. On search space and search data strategies in image registration. In *Proc. Oceans*, Washington, 2005.
- [38] A. Amankwah and O. Löffeld. Image registration by subimage selection and maximization of mutual information. In *Proc. IGARSS*, Seoul, Korea, 2005.
- [39] I. Walterscheid, A. Brenner, J. Ender, and O. Löffeld. A bistatic airborne SAR experiment and processing results. In *Conf. Proc. Intern. Radar Symposium*, Berlin, 2005.
- [40] R. Westermann and C. Rezk-Salama. Real-Time Volume Deformation. In *Proc. EUROGRAPHICS*, 2001.
- [41] C. Rezk-Salama, M. Scheuering, G. Soza, and G. Greiner. Fast Volumetric Deformation on General Purpose Hardware. In *Proc. Graphics Hardware*, 2001.
- [42] C. Rezk-Salama, P. Hastreiter, G. Greiner, and T. Ertl. Non-linear registration of pre- and intraoperative volume data based on piecewise linear transformations. In *Proc. Vision, Modeling and Visualization*, 1999.
- [43] P. Hastreiter, C. Rezk-Salama, G. Soza, G. Greiner, R. Fahlbusch, O. Ganslandt, and C. Nimsy. Strategies for brain shift evaluation. *Medical Image Analysis*, 8(4):447–464, 2004.

- [44] C. Rezk-Salama, P. Hastreiter, K. Eberhardt, B. Tomandl, and T. Ertl. Interactive Direct Volume Rendering of Dural Arteriovenous Fistulae in MR-CISS Data. In *Proc. Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention (MICCAI)*, 1999.
- [45] A. Kolb. Bildentzerrung in der Strahlentherapie. Projekt-Dokumentation Fa. positronic beam service GmbH, Rellingen, 2002.
- [46] A. Kolb and H.-P. Seidel. Interpolating scattered data with C^2 surfaces. *Computer Aided Design*, 27:4:277–282, 1995.
- [47] G. Greiner, A. Kolb, and A. Riepl. Scattered data interpolation using data-dependent optimization techniques. *Graphical Models*, 64:1–18, 2002.
- [48] A. Kolb, H. Pottmann, and H.-P. Seidel. Surface reconstruction based upon minimum norm networks. In M. Dæhlen, T. Lyche, and L.L. Schumaker, editors, *Math. Methods for Curves and Surfaces*, pages 293–304, Ulvik, Norway, 1995. Vanderbilt University Press.
- [49] A. Kolb, H. Pottmann, and H.-P. Seidel. Fair surface reconstruction using quadratic functionals. In *Proc. EUROGRAPHICS '95*, volume 14, pages 469–479. Eurographics, Blackwell Publishers, 1995.
- [50] A. Kolb and L. John. Volumetric model repair for virtual reality applications. In *Proc. EUROGRAPHICS*, pages 249–256. University of Manchester, 2001.
- [51] C. Bastuck, T. Hambürger, T. Hof, M. Keller, P. Kohlmann, J. Mehnert, S. Nowak, C. Rezk-Salama, and A. Kolb. An open and extensible framework for visualization. In *Proc. GI-Informatiktage*. Gesellschaft für Informatik, 2005.
- [52] C. Rezk-Salama and A. Kolb. A vertex program for efficient box-plane intersection. In *Proc. Vision, Modeling and Visualization*, 2005. to appear.
- [53] C. Rezk-Salama, P. Hastreiter, C. Teitzel, and T. Ertl. Interactive exploration of volume line integral convolution based on 3D-texture mapping. In *Proc. IEEE Conf. on Visualization*, 1999.
- [54] A. Kolb, L. Latta, and C. Rezk-Salama. Hardware-based simulation and collision detection for large particle systems. In *Proc. Graphics Hardware*, pages 123–131. ACM/Eurographics, 2004.
- [55] A. Kolb and N. Cuntz. Dynamic particle coupling for GPU-based fluid simulation. In *Proc. Symposium on Simulation Technique*, 2005. to appear.
- [56] R. Strzodka, M. Doggett, and A. Kolb. Scientific computation for simulations on programmable graphics hardware. *J. Simulation Practice & Theory*, 2005. to appear.
- [57] L. Latta and A. Kolb. Homomorphic factorization of BRDF-based lighting computation. In *ACM Proceedings SIGGRAPH*, volume 21:3, pages 509–516. ACM, 2002.
- [58] A. Kolb and C. Rezk-Salama. Efficient empty space skipping for per-pixel displacement mapping. In *Proc. Vision, Modeling and Visualization*, 2005. to appear.

3 Ziele und Arbeitsprogramm

Im Zusammenwirken der verschiedenen Teilprojekte im Antragspaket *Dynamisches 3D Sehen* setzt der vorliegende Antrag des Teilprojektes *2D3DProc* den Schwerpunkt auf die Kamera-nahe Datenverarbeitung. Damit hat das Teilprojekt *2D3DProc* eine enge Beziehung zu den Teilprojekten *MultiCam* und *PMDSim*. Abbildung 6 auf Seite 26 zeigt die inhaltliche Verknüpfung des Teilprojektes *2D3DProc* mit allen anderen Teilprojekten auf.

Im folgenden werden zunächst knapp die wesentlichen Projektziele formuliert (Abschnitt 3.1), für die dann im Arbeitsprogramm detailliert die geplante Vorgehensweise beschrieben wird (Abschnitt 3.2)

3.1 Ziele

Die Ziele des Teilprojektes liegen in der Erforschung grundlegender Fragestellungen beim Einsatz einer oder mehrerer, mono- oder binokularer 2D/3D-Kamerakombinationen. Hierbei stehen anwendungsübergreifende Problemstellungen im Vordergrund.

Zunächst seien die wesentlichen Randbedingungen, die für den Einsatz von 2D/3D-Kamerakombinationen unter Einbindung einer 3D-PMD-Kamera vorliegen, zusammengefasst (siehe hierzu auch die Präambel des Antragspaketes):

1. Wesentliche Kenngrößen der PMD-Sensorik:

- 1.1. relativ geringe laterale Auflösung von derzeit maximal 120×160 Pixeln
- 1.2. hohe zeitliche Auflösung der PMD-Kamera mit > 10 FPS
- 1.3. grundsätzliche Problematik aktiver Messtechniken, z.B. Ungenauigkeit bei ungünstigen Reflexionseigenschaften von Objektoberflächen
- 1.4. spezielle Problematik der Mehrphasenmessung, wodurch bei bewegten Szenen große Ungenauigkeiten in Silhouettenbereichen auftreten
- 1.5. spezielle Problematik des Messaufbaues durch getrennte Beleuchtungs- und Sensoreinheiten (*bistatischer Aufbau*)
- 1.6. Unterdrückung von Hintergrundlicht erfolgt im Photogate PMD-Ansatz aktiv (siehe Präambel), wobei eine Pixelsättigung nicht in allen Anwendungsfällen vermieden werden kann
- 1.7. aktuell keine direkte Erfassen von Farbinformation in dem PMD-Sensor

2. Sinnvolle Sensor-Kombinationen

- 2.1. mono- oder statisch binokulare Kombination eines PMD- mit einem 2D-Bildsensor mit ähnlicher zeitlicher, aber höherer lateraler Auflösung (*2D/3D-Kamera*)
- 2.2. mehrere 2D-Bildsensoren mit einer PMD-Kamera in einem *statischen, multiokularen Aufbau*
- 2.3. mehrere 2D/3D-Kameras in räumlich dynamischer Lage, die eine Szenerie beobachten (*dynamisch multiokularer Aufbau*)

Aus den genannten Randbedingungen leiten sich die zentralen Ziele des Antrages unmittelbar ab:

Untersuchung des PMD-Bildgebungsprozesses: Zur Umwandlung von PMD-Sensordaten in Tiefenmesswerte muss zunächst der PMD-Bildgebungsprozess untersucht und modelliert werden. Ziel ist es, ein mathematisches Modell auf analytischer und/oder statistischer Basis zur Beschreibung der Abbildung von PMD-Sensordaten in Tiefenmesswerte. Hierbei wird eng mit den Teilprojekten *PMDSim* und *MultiCam* zusammengearbeitet.

Kalibrierung: Ausgehend von einer 2D/3D-Kamera und des o.g. Modells sind technische Methoden zur Kalibrierung, insbesondere zur Tiefenkalibrierung, verschiedener 2D/3D-Kamerakombinationen zu entwickeln (siehe auch Abschnitt 2.1.1). In diesem Fragekomplex wird eng mit dem Teilprojekt *MultiCam* kooperiert.

Koregistrierung für dynamische Kamerapositionen: Im Falle von mehreren 2D/3D-Kameras in räumlich dynamischer Lage müssen diese zueinander registriert werden (siehe auch Abschnitt 2.1.2)

Fusion, lokale Verfeinerung und Speicherung von 2D/3D-Daten: Die Fusion der Daten der verschiedenen Sensoren, die zu einem Zeitpunkt erfasst werden ist eine zentrale Schlüsselaufgabe. Hierbei sollen Sensorfehler möglichst ausgeglichen und die fusionierten 2D/3D-Daten effizient gespeichert und zugreifbar gemacht werden (siehe auch Abschnitte 2.1.4 und 2.1.5).

Ein weiteres Ziel des Projektes ist die Weiterentwicklung des einfachen Simulators aus Abschnitt 2.2.1. Dieser Simulator soll, in Kombination mit dem Simulator des Teilprojektes *PMDSim*, in den Teilprojekten *PMDLumi* und *3D-PoseMap* dazu verwendet werden, unmittelbar auf synthetische PMD- und 2D/3D-Kameradaten zugreifen zu können.

3.2 Arbeitsprogramm

In der folgenden Darstellung des Arbeitsprogramms wird zu den in Abschnitt 3.1 genannten Forschungszielen die inhaltliche Vorgehensweise beschrieben und in Abschnitt 3.2.5 zeitlich zueinander in Beziehung gesetzt. Thematisch übergreifend wird eine optimierte Umsetzung einzelner Verarbeitungsschritte auf programmierbarer Graphikhardware untersucht.

3.2.1 Untersuchung des PMD-Bildgebungsprozesses

Aktuell ist die PMD-Kamera ein Tiefensensor. Die Kalibrierung hat als wesentliches Ziel die Tiefensensor- in Entfernungsmessdaten umzuwandeln. Im Folgenden werden derzeit bekannte Ursachen beschrieben, die dazu beitragen, dass die PMD-Sensorwerte keine direkten Entfernungswerte darstellen. Zu den Ursachen werden Ansätze zur Fehlerreduzierung erläutert, die im Rahmen des Projektes tiefergehend untersucht werden sollen:

Bistatischer Aufbau von Beleuchtung und Sensor: Aufgrund des konstruktiv bedingten Abstandes zwischen Beleuchtung und PMD-Sensor-Chip (bistatischer Aufbau) ergibt sich bei der Laufzeitmessung eine Verzerrung durch einen ortsvarianten Versatz zwischen Sensor-Objekt-Entfernung und Lichtlaufzeit (siehe Abbildung 4).

Gesucht wird der Tiefenabstand eines Objektpunktes \mathbf{P} , also p_z in lokalen Kamera-Koordinaten^{3,4}, gemessen wird aber

$$\overline{\mathbf{BP}} + \overline{\mathbf{PS}} = \sqrt{(p_x - b_x)^2 + p_y^2 + p_z^2} + \sqrt{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2} \quad (1)$$

³Koordinatenschreibweise: $\mathbf{P} = (p_x, p_y, p_z)^T$

⁴hierbei wird ein linkshändiges Koordinatensystem angenommen

wobei \mathbf{B} die Position der Beleuchtungsmoduls und \mathbf{S} die des PMD-Sensors darstellt.

Das Problem hat starke Parallelen zu bistatische Aufnahmesituationen beim Synthetic Aperture Radar (SAR). In diesem Kontext zeigt sich bei einem Sender (hier Beleuchtung) und einem örtliche versetzten Empfänger (hier PMD-Sensor-Chip) eine als *flat top hyperbola* bekannte Verzerrungsfunktion [1] für die Entfernungswerte, analog Gleichung (1). Loffeld et al. [2] zeigen, wie diese Verzerrung im SAR-Kontext kompensiert werden kann.

Entsprechend muss zur Korrektur der Sensorwerte ein angepasste Verzerrungsmodell entworfen werden.

Hierbei ist von Vorteil, dass bei bekannten intrinsischen Parametern in der Bildebene der Einfallswinkel α bekannt ist. In diesem Fall ergibt sich der gesuchte Abstandswert p_z aus Gleichung (1) und dem bekannten Wert b_x direkt als analytische Lösung einer quadratischen Gleichung.

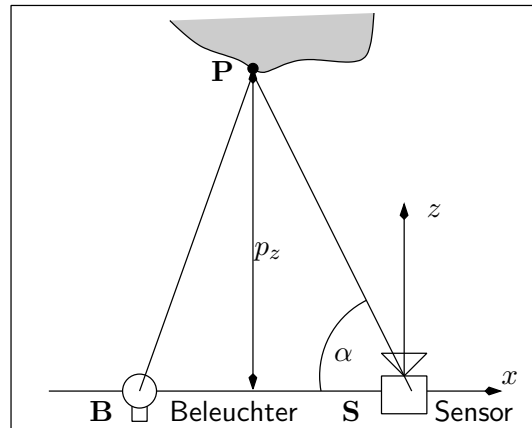


Abbildung 4: Bistatischer Aufbau des PMD-Sensors mit Beleuchtungsmodul.

Verteilte Beleuchtung: Die aktive Beleuchtungseinheit eines PMD-Systems besteht im Normalaufbau aus zwei räumlich getrennten Modulen. Jedes dieser Module besteht seinerseits aus einer verteilten Anordnung von Lichtquellen (LEDs). Aus dieser multistatischen Anordnung resultieren eine Reihe von Effekten, die das Lichtsignal an den PMD-Sensorpixeln direkt beeinflussen.

Einerseits besteht das resultierende Empfangsecho eines einzelnen Objektpunktes \mathbf{P} im Raum aus den Überlagerungen aller LED-Einzelsignale. Andererseits entstehen im 3D Raum konstruktive und destruktive Interferenzen der von den PMD-Beleuchtungsmodulen ausgestrahlten Modulationswellen. Dieser Effekt ist vergleichbar mit dem Abbildungsverhalten Synthetischer Apertur Radarsysteme (SAR), bei denen Auflösungszellen in Metergröße (Facetten) als unendliche Überlagerung individueller, in dieser Auflösungszelle verteilter Elementarziele modelliert werden. Als Ergebnis der kohärenten Beleuchtung sind die Helligkeitsdaten Rayleigh verteilt und die Entfernungsphasen gleichverteilt. Diesen Effekt bezeichnet man als Speckle-Rauschen. Speckle-Rauschen ist proportional zur Wellenlänge.

Ein ähnlicher Effekt wird bei der PMD-Bildgewinnung erwartet. Die Kohärenz ergibt sich hier in Bezug auf die verwendete Modulationswellenlänge, die in der Größenordnung von einigen 10 Metern liegt. Das sich ergebende Specklemuster wird aufgrund der geringen Bildausdehnung im Verhältnis zur Wellenlänge weniger statistisch erscheinen und mehr einem *Floating Pattern Noise* ähneln, welches sich in seiner Verteilung abstandsabhängig ändert. Diese Einflüsse verkomplizieren die Koregistrierungsproblematik aufgrund ihrer multiplikativen Eigenschaften nicht unbeträchtlich (siehe Abschnitt 3.2.3). Ein Ziel der Arbeiten ist die Erforschung dieser Problematik und die

schlussendliche Klärung der Frage, mit welcher Genauigkeit eine dynamische Kalibrierung möglich ist.

Eine weitere Problemstellung ergibt sich im Hinblick auf die Ermittlung der Entfernung aus der Phase. Während bei einer großen (gegen Unendlich strebenden) Anzahl von Beleuchtungsquellen von rein statisch verteilten Phasenfehlern ausgegangen werden könnte, werden bei einer endlichen Anzahl von LEDs (< 10) diese Einflüsse eher einen Floating Pattern Phase Noise ähneln. Es ergibt sich ein Winkel- und Entfernungsabhängiger quasi deterministischer Phasen- und Entfernungsfehler, der sich bereit im mm-Bereich auswirken dürfte. Die Fragestellung, inwieweit und wie diese nur quasi-deterministischen Einflüsse dynamisch kalibrierbar sind, ist weiterer Gegenstand dieser Arbeiten.

3.2.2 Kalibrierung

Für die Kalibrierung der PMD-Kamera wird entweder von einer einzelnen 3D-Kamera oder eine einzelne 2D/3D-Kamera (mono- oder statisch binokular) ausgegangen.

Hinsichtlich einer hochgenauen Kalibrierung der PMD-Kamera wird derzeit im ZESS ein spezielles *Präzisions-Testfeld* konzipiert (siehe Teilprojekt *MultiCam*, sowie Abschnitt 5 zum Bezug zu einem beantragten BMBF-Projekt). Dieses Präzisionstestfeld dient dazu, die mathematischen Modelle aus Abschnitt 3.2.1 zu verifizieren und ggf. zu überarbeiten bzw. zu verfeinern.

Eine Kalibrierung mit einem Präzisions-Messplatz ist sehr zeit- und kostenintensiv. Entsprechend ist ein weiteres Forschungsziel die Integration der Tiefenkalibrierung in effiziente Kalibriertechniken zur Korrektur linearer und nicht-linearer Verzerrung in der Bildebene, wie sie für 2D-Bildkameras genutzt werden (siehe Abschnitt 2.1.1). Hierbei wird auf bereits vorhandene Ergebnisse aufgebaut (siehe Abschnitt 2.2.1 und Todt et al. [3]). Diese bildbasierten Methoden [4] liefern durch die 3D-Registrierung von 2D Mustern Tiefenwerte, die mit den Daten der PMD-Kamera abgeglichen werden können. Konzeptionell ergibt sich daraus ein schnelleres und weniger aufwendiges Kalibrierverfahren. Grundsätzlich werden hierbei allerdings Probleme aufgrund der relativ geringen lateralen Auflösung der PMD-Kamera erwartet, welche durch die hohe Auflösung der 2D-Bildkamera lokal ausgeglichen werden sollen.

Die Kalibrierung ist auch Teil des Arbeitsprogramms im Teilprojekt *MultiCam*. Hierbei liegt der Fokus jedoch stärker auf der internen Kalibrierung der Multichipkameras, insbesondere der monokularen 2D/3D-Kamera. Grundsätzliche Fragestellungen der Kalibrierung von 2D/3D-Kameras werden in enger Kooperation mit dem Teilprojekt *MultiCam* bearbeitet.

Für statisch binokulare 2D/3D-Kameras können bildbasierte Kalibriertechniken auch simultan arbeiten. Hierbei wird durch die 3D-Registrierung der 2D Muster indirekt die Transformation zwischen den beiden Kameras ermittelt.

Nach aktuellem Wissensstand gehen die Antragsteller davon aus, dass alle Kalibrieraufgaben mit allen in dem Projekt betrachteten Kameraaufbauten (siehe Abschnitt 3.1) *separierbar* sind, d.h. dass für komplexere Aufbauten mit mehreren Kameras jede Kamera für sich

kalibriert werden kann.

3.2.3 Koregistrierung für dynamische Kamerapositionen

Die Koregistrierung von Bildern (allgemein: 2D-Datenarrays) beschreibt die Aufgabe, zwei oder mehrere Bilder der gleichen Szene, die aus unterschiedlichen Aufnahmepositionen und mit verschiedenen Aufnahmeverfahren erfasst wurden, so aufeinander abzubilden, dass korrespondierende Pixel in den Daten den gleichen Objektpunkt beschreiben. Die Aufnahmeverfahren können abweichende Auflösung und Dimension besitzen und aufgrund unterschiedlich stark ausgeprägter Störphänomene abweichende statistische Eigenschaften aufweisen. Die Pixelinhalte sind im konkreten Fall von 2D/3D-Kameras multivariat (RBG, Reflektivität und Tiefe).

Ein wesentlicher Teilschritt der Koregistrierung besteht in der Identifikation von Ähnlichkeiten zwischen korrespondierenden Merkmalen, Marken oder Pixelgruppen und der Bestimmung ihrer relativen Verschiebung auf Subpixelgenauigkeit. Von zentraler Bedeutung hierfür ist die Definition des Ähnlichkeitsmaßes, mit dessen Hilfe die Ähnlichkeit von korrespondierenden Merkmalen beschrieben wird. Abhängig von den Bildinhalten und deren statischen Eigenschaften liefern unterschiedliche Ähnlichkeitsmetriken unterschiedliche Ergebnisse und bedingen i.a. unterschiedliche Vorgehensweisen bei der Koregistrierung.

Vor diesem Hintergrund läßt sich die Problematik in eine Reihe von Einzelpunkten aufgliedern, die bearbeitet werden sollen:

1. Untersuchung und Entwicklung von Algorithmen zur Koregistrierung von PMD (Reflektivität und Entfernung) und 2D-Kameradaten (RGB)
 - Ähnlichkeitsmaße für multivariate Pixelmerkmale: Korrelation, Kolmogorov's Information, Kullback's Information, Mutual Information, Alignability, Gradiententechniken
 - Optimale, ähnlichkeitsmaßangepasste Templatewahl automatische Templategenerierung: Maximierung der spektralen Bandbreite (Korrelation), Maximierung der Template-Entropie (Informationsmaße), Binsize und Klassengröße
 - Geometrie-basierte Ähnlichkeitsmaße, z.B. Abstände von Punktwolken unter Einbeziehung der lokalen 3D-Geometrie mit *Iterative Closed Point (ICP)*-Ansätzen [5]
2. Bestimmung von Verschiebungsvektorfeldern anhand
 - simulierter Daten (Bilder unterschiedlicher Pixelgeometrien und Störstatistiken)
 - realer Daten (PMD-Bilddaten 120×160 Pixel, 64×16 Pixel, 2D-Farbdaten 1024×768 Pixel)
3. Bestimmung der Transformationsvorschriften zwischen den 5D-Datensätzen (RGB, Reflektivität und Tiefe)
4. Darstellung der Ergebnisse mit simulierten und experimentellen Daten

3.2.4 Fusion, lokale Verfeinerung und Speicherung 2D/3D-Daten

Im Rahmen der Fusion von 2D- und 3D-Daten soll neben der Speicherung der registrierten Daten mit unterschiedlicher Auflösung die Verfeinerung der grob aufgelösten 3D-Daten durch die hochaufgelösten 2D-Daten untersucht werden. Grundsätzlich wird im folgenden davon ausgegangen, dass die Daten registriert vorliegen (siehe Abschnitt 3.2.3).

Zur Fusion der dichten 2D-Farbdaten mit den „dünnen“ PMD-Entfernungsdaten kommen Interpolationstechniken (Bezier-Splines und Kalman-Filter) zum Einsatz. Die lokale Verfeinerungen der Tiefendaten soll zunächst bei Verwendung einer einzelnen 2D/3D-Kamera untersucht werden. Hierzu werden Methoden zur Identifikation von Objektgrenzen durch einfache Tiefensegmentierung mittels Schwellwertverfahren oder durch aktive Kantenverfolgung in den grob aufgelösten 3D-Daten untersucht. Eine anschließende Abbildung der groben Objektkanten in die 2D-Bilddaten in Kombination mit lokaler Kantenextraktion ermöglicht eine schnelle Identifikation der feinen Objektkanten in 2D. Die Bestimmung zugehöriger Tiefenwerte kann ohne weitere Information nur durch lokale 1D- oder 2D-Interpolation bzw. lokale Geometrierekonstruktion erfolgen.

Im Falle eines multiokularen Kameraaufbaus mit mindestens zwei 2D-Bildkameras können Ansätze, wie sie zur Verfeinerung der visuellen Hülle verwendet werden zum Einsatz kommen (siehe Abschnitt 2.1.4). Insbesondere der Einsatz lokaler Mutual Information Maße zur Bewertung und ggf. Korrektur von Oberflächenpunkten, ähnlich zu Kuzu und Sinram [6], erscheint hier vielversprechend. Im Grunde entspricht dies einem kombinierten Ansatz aus PMD-Entfernungsmessung und Stereovision (siehe auch Teilprojekt *3D-PoseMap*).

Die Speicherung der fusionierten Daten hat vornehmlich das Ziel, sowohl eine effiziente Integration von Daten aus mehreren Sensoren, als auch einen effizienten Zugriff auf die fusionierten 2D/3D-Daten zu ermöglichen. Eine problemspezifische Integration der Daten über die Zeit ist nicht Bestandteil dieses Teilprojektes (siehe hier Teilprojekte *PMDLumi* und *3D-PoseMap*).

Im Falle einer monokularen 2D/3D-Kamera besitzen die 2D- und 3D-Daten zu einem festen Zeitpunkt einen kanonischen räumlichen Bezug. In dieser Situation können die Daten zunächst als 2D Datenfelder mit fünf Komponenten (RGB, Reflektivität und Tiefe) beschrieben werden.

Zur Speicherung lokal verfeinerter, monokularer 2D/3D-Daten sollen adaptive Datenstrukturen untersucht werden. Zur Komprimierung von Bilddaten werden u.a. Wavelet-basierte Techniken verwendet. Shapiro [7] führte den *Embedded Zerotree Wavelet (EZW)* Ansatz ein, bei dem ganze Teilbäume einer Wavelet-Zerlegung nach einer heuristischen Bewertung bei der Kodierung verworfen werden. Die Untersuchung dieser Ansätze zur Speicherung von lokal verfeinerten 2D/3D-Daten ist Untersuchungsgegenstand dieses Antrages. Zu beachten ist hierbei, dass die Anzahl von Verfeinerungsebenen aufgrund der unterschiedlichen Auflösungen der 2D- und der 3D-Kamera mit etwa 2 – 3 deutlich geringer ist als bei einer Vollbild-Kodierung mit dem EZW-Algorithmus.

Für die Speicherung lokal verfeinerter, multiokularer 2D/3D-Daten ist aus heutiger Sicht nicht entscheidbar, ob sich eine strukturierte Speicherung z.B. auf Basis einer parametrisierten Kugel oder eine unstrukturierte Kodierung besser eignet. Erzwingt eine strukturierte

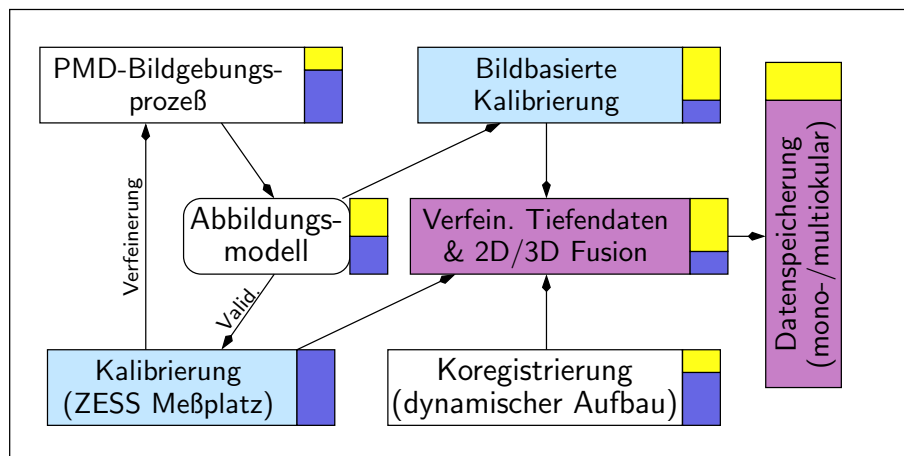


Abbildung 5: Zusammenhang zwischen den Arbeitspaketen aus Abschnitt 3.2 und deren Aufteilung zwischen den beiden Arbeitsgruppen von Prof. Kolb (gelb) und Prof. Löffel (blau).

Speicherung i.a. ein Resampling der Messdaten, ist der Zugriff auf die Daten beim unstrukturierten Ansatz deutlich ineffizienter, wenn keine räumliche Kohärenz der Datenzugriffe vorliegt. Aufgabe innerhalb des Projektes ist es, für den statisch multiokularen, sowie für den dynamisch multiokularen Aufbau entsprechende Untersuchungen durchzuführen.

3.2.5 Zeitliche Einordnung der Aufgaben

Die oben genannten Aufgaben stehen in klarer inhaltlicher Relation zueinander, ohne dass sie strikt sequentiell bearbeitet werden müssen. Der Zusammenhang ist graphisch in Abbildung 5 aufgezeigt. Hierbei wurde eine etwas andere Gruppierung als in Abschnitt 3.2 vorgenommen, die stärker die inhaltlich zusammenhängenden Teilaufgaben widerspiegelt.

Arbeitspaket	2006				2007				2008				2009			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
PMD-Bildgebungsprozeß	x	x	x	x	x	x	x									
Kalibrierung (ZESS Messplatz)			x	x	x	x	x									
Bildbasierte Kalibrierung				x	x	x	x	x	x							
Verfeinerung Tiefendaten 2D/3D Fusion						x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Koregistrierung (dynamischer Aufbau)								x	x	x	x	x	x	x	x	x
Datenspeicherung (mono-/multiokular)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x					

Tabelle 1: Zeitliche Einordnung der Einzelaufgaben in die verschiedenen Quartale im Laufe der Projektbearbeitung

Tabelle 1 zeigt die zeitliche Einordnung der Einzelaufgaben in die verschiedenen Quartale im Laufe der Projektbearbeitung.

Literatur zu Zielen und Arbeitsprogramm

- [1] D. Aria, A. Monti Guarnieri, and F. Rocca. Focusing bistatic synthetic aperture radar using dip move out. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(7):1362–1376, 2004.
- [2] O. Loffeld, H. Nies, V. Peters, and S. Knedlik. Models and useful relations for bistatic SAR processing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(10), 2004.
- [3] S. Todt, C. Rezk-Salama, and A. Kolb. Real-time fusion of range and light field images. SIGGRAPH Poster-Session, 2005.
- [4] Human Interface Technology Lab, University of Washington. ARToolKit. www.hitl.washington.edu/research/artoolkit, 2005.
- [5] P. Biber, S. Fleck, and W. Straßer. A probabilistic framework for robust and accurate matching of point clouds. In *26th Pattern Recognition Symposium (DAGM)*, 2004.
- [6] Y. Kuzu and O. Sinram. Volumetric model refinement by shell carving. In *Prof. XXth ISPRS Congress*, pages 128–153, 2004.
- [7] J. Shapiro. Embedded image coding using zerotrees of wavelet coefficients. *IEEE Trans. on Signal Proc.*, 41(12):3445–3462, 1993.

3.3 Untersuchungen am Menschen

finden nicht statt.

3.4 Tierversuche

finden nicht statt.

3.5 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 Personalkosten

1. 1 BAT2a-Stelle für die Dauer von 2 Jahren
2. 2 50%-BAT2a-Stellen für die Dauer von 2 Jahren

3. Zwei studentische Hilfskräfte⁵ mit insgesamt 120h/Monat

Am Lehrstuhl für Computergraphik & Multimediasysteme wird ein einzustellender Doktoranden mit der Erforschung der oben spezifizierten Probleme betraut. Die beiden halben BAT2a-Stelle sind dem ZESS, Projektbereich 2 unter der Leitung von Prof. Loffeld zugeordnet. Die Doktoranden werden mit hoher Wahrscheinlichkeit aus den Reihen der Absolventen des Fachbereiches gewonnen. Dieser Personenkreis hat bis zum Erwerb des Diploms eine fundierte theoretische und praktische Ausbildung in den projektspezifischen Problemfeldern erworben. Die Zuordnung der Forschungsaufgaben zu den beiden Arbeitsgruppen ist in Abbildung 22 dargestellt.

Geschätzter Aufwand im 3. und 4. Förderungsjahr:

wie im 1. und 2. Förderungsjahr

4.2 Wissenschaftliche Geräte

- | | | |
|---------------------------|--|---------------------|
| 1. | PMD-Kamera 120 × 160 Pixel
gemäß Angebot Fa. PMD-Technologies | 5.788,40 EUR |
| Summe (inkl. MwSt) | | 5.788,40 EUR |

Begründung des Bedarf

Um einen schnellen Projektstart mit realen PMD-Messdaten zu ermöglichen, ist der Einsatz einer PMD-Kamera unbedingt erforderlich. Die Kamera wird in einem binokularen Aufbau mit einem 2D-Bildsensor zu einer 2D/3D-Kamerakombination verknüpft.

Es gibt am ZESS zwar eine Reihe von PMD-Prototypen, die jedoch hinsichtlich der Auflösung hinter der aktuellen PMD-Kamera der Firma PMD-Technologies zurückbleiben. Die höhere Auflösung ist in diesem, wie in allen vernetzten Teilprojekten des Antragspaketes von großer Bedeutung. Daher ist eine frühzeitige Auseinandersetzung mit den spezifischen Anforderungen dieser höher auflösenden PMD-Kamera unerlässlich.

4.3 Verbrauchsmaterial

Es werden in geringem Umfang Druckkosten pro Jahr anfallen.

- | | | |
|-----------------------|--|----------------|
| 1. | Trockentinte für Farbsublimationsdrucker | 300 EUR |
| 2. | Druckaufträge für Poster u.ä. | 100 EUR |
| Summe pro Jahr | | 400 EUR |

Geschätzter Aufwand im 3. und 4. Förderungsjahr:

wie im 1. und 2. Förderungsjahr

⁵Personenbezeichnungen wie „Mitarbeiter“ sind durchweg geschlechtsneutral zu verstehen

4.4 Reisen

Als jährlichen Reisekosten werden in den ersten beiden Jahren veranschlagt⁶:

1.	Präsentation von Ergebnissen auf internationalen Tagungen	
1.1	EUROGRAPHICS, PacificGraphics oder SIGGRAPH	4.000 EUR
1.2	ICCV oder ECCV	4.000 EUR
2.	Arbeitstreffen m. externen Partnern	1.000 EUR
Summe pro Jahr		9.000 EUR

Geschätzter Aufwand im 3. und 4. Förderungsjahr:

wie im 1. und 2. Förderungsjahr

Begründung:

Die zentralen Themen, die in diesem Projekt adressiert sind, sind den beiden Forschungsrichtungen Computergraphik (1.1) und Computervision (1.2) zuzurechnen. Entsprechend sind Forschungsergebnisse in beiden Themengebieten zu veröffentlichen.

4.5 Publikationskosten

Für Publikationen werden für die ersten beiden Jahre veranschlagt:

1.	Kosten für Farbseiten in Journalen oder Tagungsbänden	750 EUR
Summe pro Jahr		750 EUR

Geschätzter Aufwand im 3. und 4. Förderungsjahr:

wie im 1. und 2. Förderungsjahr

4.6 Sonstige Kosten

Keine

5 Voraussetzung für die Durchführung des Vorhabens

Abbildung 6 stellt die wesentlichen Verknüpfungen zwischen dem vorliegenden Projektantrag *2D3DProc* und den anderen Teilprojekten des Antragspaktes *Dynamisches 3D-Sehen* dar.

Mit dem Teilprojekt *MultiCam* wird eng im Bereich der Kalibrierung, insbesondere der Tiefenkalibrierung von 2D/3D-Kamerakombinationen kooperiert. Das Präzisions-Testfeld des Teilprojektes *MultiCam* stellt hierzu eine IP-basierte Schnittstelle Remote-Experimente zur Verfügung, die zur Validierung von Kalibrierungsansätzen dienen soll.

⁶Mittlere Kosten für eine der Konferenzen für zwei Teilnehmer

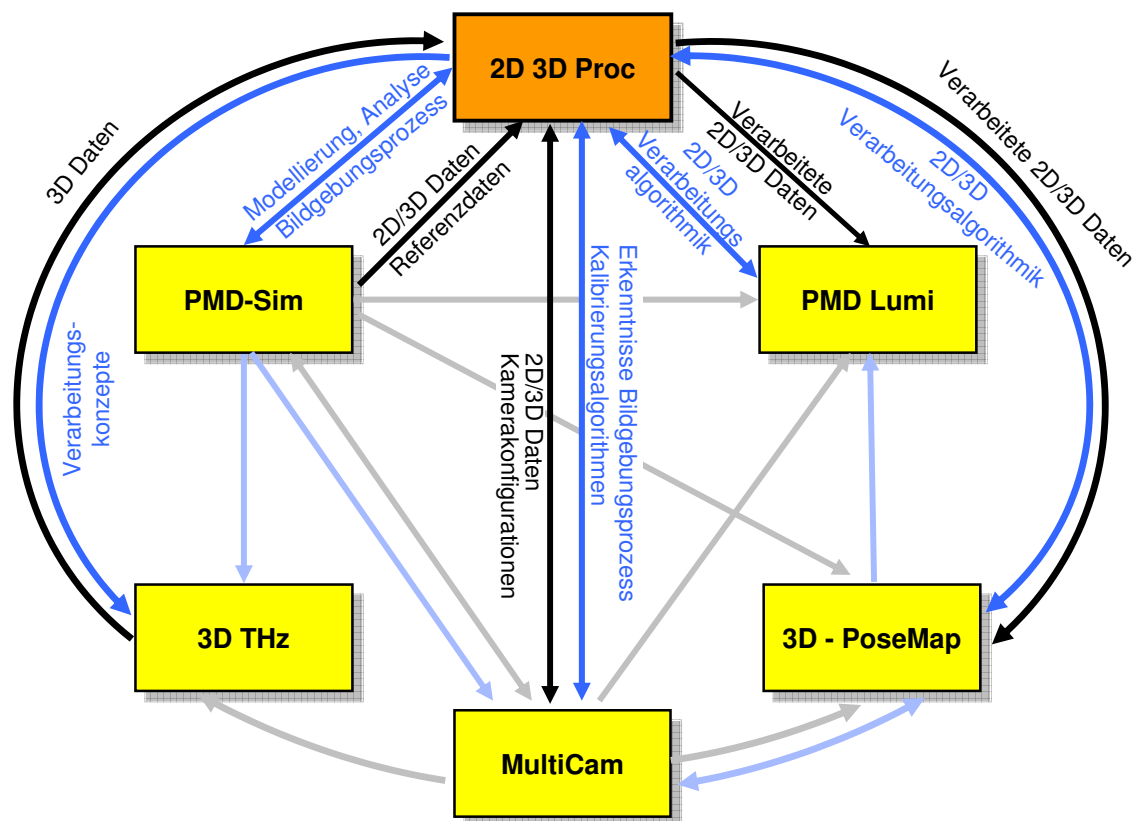


Abbildung 6: Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Teilprojekten des Antragspaketes *Dynamisches 3D-Sehen*. Schwarze Pfeile weisen auf den Austausch von Daten hin, blaue Pfeile stellen den Austausch von Know-How oder anderer Informationen dar.

Die Analyse des Bildgebungsprozesses wird in enger Abstimmung mit dem Simulationsprojekt *PMDSim* erfolgen. Durch die Nutzung von idealen und realistisch verrauschten PMD-Daten aus diesem Projekt ist zudem eine Validierung der Algorithmik in *2D3DProc* möglich. Die Erkenntnisse zum Bildgebungsprozess finden direkten Einzug in das Teilprojekt *MultiCam*, welche dort der Optimierung der konkreten Hardware-Konfiguration, beispielsweise beim Aufbau der Beleuchtungseinheit, dienen.

Der vorliegende Antrag zum Teilprojekt *2D3DProc* konzentriert sich auf anwendungsübergreifende Fragestellungen der 2D/3D-Datenverarbeitung. Dadurch ist ein enger Bezug zu den Teilprojekten *PMDLumi* und *3D-PoseMap* gegeben. Beide Projekte erarbeiten ihrerseits anwendungsoptimierte Algorithmen und Datenstrukturen, welche die aufbereiteten Daten aus *2D3DProc* nutzen können. Mit beiden Projekten wird ein intensiver Austausch in Fragen der 2D/3D-Verarbeitungsalgorithmik stattfinden. Es wird erwartet, dass die Umsetzung von Ansätzen aus unterschiedlichen Forschungskontexten zu ähnlich gelagerten Problemstellungen wichtige Erkenntnis liefern.

Die Vernetzung mit dem Teilprojekt *3DTHz* konzentriert sich einerseits auf die Nutzung der Algorithmen zur 2D-Datenverarbeitung in Bereich von THz-Systemen. Andererseits werden

im zweiten Projektabschnitt (3. und 4. Jahr) erste Ergebnisse in der 3D-Bildrekonstruktion erwartet, welche dann unmittelbar in dem Teilprojekt *2D3DProc* verarbeitet werden können.

Im Rahmen der BMBF-Leitinnovation *Schlüsselkomponenten für die Service Robotik* wurde vom ZESS unter der Leitung von Prof. Loffeld und in Zusammenarbeit mit den Firmen PMDTec und ifm-Elektronik die Projektskizze *HiCam3* formuliert und eingereicht. Als Ergebnis der Skizzenbegutachtung erhalten die Antragsteller die Möglichkeit, einen gemeinsamen BMBF-Antrag zu formulieren. Zentraler Gegenstand dieses Antrags ist die infrastrukturelle Ausstattung zum Aufbau des in Abschnitt 3.2.2 beschriebenen Mess- und Kalibrierplatzes.

5.1 Zusammensetzung der Arbeitsgruppe

Die Arbeitsgruppe von Prof. Kolb umfaßt derzeit fünf Wissenschaftler, diejenige von Prof. Loffeld besteht aus neun wissenschaftlichen Mitarbeitern. Aus diesem Personenkreis werden neben den aus den beantragten Mitteln zu finanzierenden Mitarbeitern folgende Personen in die Bearbeitung des beantragten Projektes eingebunden sein:

1. Prof. Dr.-Ing. Andreas Kolb, Lehrstuhlinhaber Computergraphik & Multimediasysteme (CG), ZESS-Mitglied
2. Prof. Dr.-Ing. habil. Otmar Loffeld, ZESS Projektbereichsleiter, Projektbereich 2 (PB 2)
3. Dr.-Ing. Christof Rezk-Salama (CG), Leiter des Arbeitsgebietes Wissenschaftliche Visualisierung
4. M.Sc. Seyed Ghobadi (PB 2), Arbeitsgebiet: PMD/CMOS Imaging
5. M.Sc. Fayez Hasouneh (PB 2), Arbeitsgebiet: PMD-Signalanalysis und Optical Local Positioning Systems
6. Dipl.-Phys. Omar Löpprich (PB 2), Arbeitsgebiet: Distributed 2D/3D Imaging Sensors
7. Dipl.-Ing. Valerij Peters (PB s), Arbeitsgebiet: PMD-Simulation
8. M.Sc. Arun Prasad (PB 2), Arbeitsgebiet: PMD-Systemtechnik
9. Dipl.-Ing. Severin Todt (CG), Arbeitsgebiet: Graphikkarten-basierte 2D/3D-Bildverarbeitung, Lichtfeldrekonstruktion

5.2 Zusammenarbeit mit anderen Wissenschaftlern

Es wird mit den anderen Arbeitsgruppen im Rahmen dieses Antragspaketes in enger Abstimmung kooperiert (siehe Präambel *Dynamisches 3D-Sehen*).

Eine Zusammenarbeit besteht zudem mit folgenden Wissenschaftlern bzw. Arbeitsgruppen:

Dr. Strzodka, Caesar Research Center/Stanford University:

Simulationsalgorithmen auf programmierbarer Graphikhardware

Prof. Wiechert, FOMAAS⁷, Universität Siegen: Simulationen und Visualisierung von Partikelsystemen und Hochenergiemühlen unter Einsatz programmierbarer Graphikhardware

Universitätsklinik Erlangen: Entwicklung intuitiver Benutzerschnittstellen und spezialisierter Darstellungsverfahren für konkrete klinische Problemstellungen im Bereich Visualisierung.

5.3 Arbeiten im Ausland und Kooperation mit ausländischen Partnern

Kooperationen besteht mit folgenden ausländischen wissenschaftlichen Einrichtungen:

Siemens Research, Princeton, USA: Entwicklung von Visualisierungsverfahren mit dem Schwerpunkt der Generierung von Transferfunktionen zur Visualisierung und Analyse tomographischer Bilddaten mit breitem Anwendungsspektrum im Bereich Medizintechnik

VRVis Research Center, Österreich: Arbeiten im Bereich prototypischer Applikationen für die Segmentierung und Fusion medizinischer Bilddaten und zur Weiterentwicklung echtzeitfähiger Volumenvisualisierung.

5.4 Apparative Ausstattung

Der Lehrstuhl für Computergraphik & Multimediasysteme besitzt die räumliche und apparative Ausstattung zur Durchführung des beantragten Projektes. Die Rechner-Ausstattung umfasst neben PCs für die Ausbildung mehrere Arbeitsplatzrechner für Mitarbeiter mit Dual-Prozessoren und, teilweise stereo-fähigen, Graphikkarten.

Am ZESS existieren mehrere PMD-Prototypen, sowie eine weitreichende Infrastruktur für Sensorsysteme im allgemeinen und optische Sensorik im besonderen.

Des Weiteren wurde kürzlich ein HBFG-Antrag auf ein Labor für Virtual Environments (DFG Antragsnummer HBFG-013-180) positiv beschieden. Der Aufbau und die operative Inbetriebnahme ist für das Jahr 2006 geplant.

5.5 Laufende Mittel für Sachausgaben

Weitere Mittel für Sachausgaben, die über die speziellen Verbrauchsmaterialien unter 4.3 hinausgehen, werden vom Lehrstuhl für Computergraphik & Multimediasysteme und vom ZESS getragen.

⁷FOMAAS= Forschungsinstitut für Multidisziplinäre Analysen und Systemoptimierung

5.6 Sonstige Voraussetzungen

keine

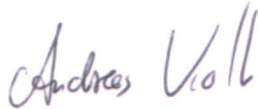
6 Erklärungen

1. Es bestehen keine thematischen Zusammenhänge zwischen dem Vorhaben und Arbeiten eines am Ort befindlichen Sonderforschungsbereiches.
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.
3. Der Vertrauensdozent der Hochschule wird unverzüglich von dieser Antragstellung unterrichtet.

6.1 Max-Planck-Institut

Nicht anwendbar.

7 Unterschriften



(Prof. Dr. Andreas Kolb)



(Prof. Dr. habil. Otmar Loffeld)

8 Verzeichnis der Anlagen

1. Tabellarischer Lebenslauf mit Schriftenverzeichnis
2. Einführender Artikel zum Photonic Mixing 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.
3. Kurzprofil des Zentrums für Sensorsysteme (ZESS) als zentrale wissenschaftliche Einrichtung der Universität Siegen
4. IPP-Broschüre des DAAD