

Entwicklung eines vielseitigen und robusten Laserscanners
für 3D-Modellierung und Exploration mit einem
Roboterarm

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing.
Simon Kielhöfer

2016

1. Referent Prof. Dr.-Ing. Tobias Ortmaier
2. Referent Prof. Dr.-Ing. Eduard Reithmeier
Tag der mündlichen Prüfung: 19.04.2016

Meiner Familie Betti, Kathi „Charly“ und Emil.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Robotik und Mechatronik des Deutschen Luft- und Raumfahrt-zentrums (DLR).

Ich möchte zunächst dem Institutsleiter Prof. Alin Albu-Schäffer danken, dass er es ermöglicht hat, diese Arbeit zu verwirklichen. Mein herzlicher Dank geht an Prof. Gerd Hirzinger, der mir das Vertrauen gab, auf dem Gebiet der optischen Entfernungsmessung zu arbeiten. Er hat mit dem Institut eine besondere Umgebung geschaffen, die mich stets motivierte und antrieb. Danken möchte ich auch Prof. Tobias Ortmaier für die Betreuung der Arbeit und seine hilfreichen Ratschläge.

Meinen Kollegen gilt mein besonderer Dank. Ohne ihre Mitarbeit, Hilfe, Kritik, ihren Rat und auch ihre moralische Unterstützung wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Ich danke Franz Hacker, Thomas Bahls und Rene Rittgarn für die Mitarbeit am *VR-SCAN* Prototypen, Tilo Wüsthoff für das durchdachte Design, Holger Urbanek für die hervorragenden Fotos, Christian Rink und Tim Bodenmüller für ihre kritischen Anmerkungen. Michael Suppa danke ich besonders für die ausdauernde Unterstützung und Förderung meiner Arbeit, die schon mit meiner Diplomarbeit begann. Ich danke Klaus Arbter, Jörg Schott und Robin Gruber für fachübergreifende Diskussionen und Robert Haslinger dafür, ein exzellenter Labor- und Diskussionspartner zu sein. Werner Friedl, Alexander Nothhelfer und Jordi Artigas bin ich sehr für ihre Kollegialität dankbar. Den Studenten Markus Bihler, Bernat Tiana, Robert Csaky, Antje Rücker und Thomas Schwerin, die mit ihren Abschlussarbeiten und Praktika am Projekt mitgewirkt haben, möchte ich ebenfalls meinen aufrichtigen Dank aussprechen.

Ich danke meinen Eltern, ohne die ich nicht wäre.

Ganz besonders möchte ich meine geliebte Frau Bettina, Katharina und meinen Sohn Emil hervorheben, die mich immer daran erinnern haben, worin der wahre Sinn liegt. Schubidu.

Simon Kielhöfer

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird die Entwicklung des *VR-SCAN* präsentiert, ein vielseitiger und robuster Triangulationsscanner für die Robotik.

Die optische Wahrnehmung ermöglicht dem Roboter, eine Vielzahl von Aufgaben zu erfüllen. Die Perzeption muss daher vielseitig sein. Ein Sensor kann jedoch nicht alle Anforderungen erfüllen. In dieser Arbeit wird die Strategie verfolgt, einen inhärent vielseitigen Sensor für ein klar abgegrenztes Szenario zu entwickeln: Der *VR-SCAN* soll ein Sensor für die autonome 3D-Modellierung und Exploration an einem Roboterarm sein.

Die zunehmende Autonomie in der Robotik erfordert zudem eine robuste Perzeption, die unter unvorhergesehenen und veränderlichen Umweltbedingungen zuverlässig funktioniert. Der Roboter soll unter Ausschluss der Gefährdung von Umwelt und sich selbst die ihm gestellten Aufgaben erledigen.

Die Anforderungen von autonomer Modellierung und Exploration an den Sensor werden analysiert und daraus zwei Hypothesen zu Vielseitigkeit und Robustheit abgeleitet. Die daraus entstehenden Anforderungen sind die Grundlage für die Konstruktion des *VR-SCAN*: Vielseitigkeit wird durch eine große Messtiefe und variable Fokussierung sichergestellt. Robustheit gegenüber falschen Messergebnissen erlangt der Sensor durch Konfidenzbewertung jedes Messwertes. Dadurch werden Freiraummessungen möglich.

Durch Verwendung und Entwicklung sehr kleiner Komponenten wird eine hohe Integrationsdichte erreicht: Ein MEMS Mikrospiegel, eine fasergekoppelte Laserdiode, ein Mikromotor zur Fokussteuerung und ein kompaktes Dreilinsenobjektiv bilden zusammen mit einem zentralen FPGA ein kompaktes Sensorsystem.

Ein patentiertes Kalibrierverfahren wird beschrieben und angewendet, und damit die Funktionsfähigkeit des Laserscanners erfolgreich bewiesen. Der *VR-SCAN* vereint herausragende Eigenschaften wie große Messtiefe, Robustheit durch Konfidenzbewertung und hohe Genauigkeit im Nahbereich in einem kleinen und leichten Gehäuse. Er erfüllt damit die aufgestellten Hypothesen als robuster und vielseitiger Perzeptionssensor für die Robotik.

Schlüsselbegriffe: Laserscanner, Vielseitigkeit, Robustheit, Robotik

Abstract

Title: *Development of a Versatile and Robust Laser Scanner for 3D Modelling and Exploration with a Robot Arm*

This work presents the development of the *VR-SCAN*, a versatile and robust triangulation scanner for robotics.

Through optical perception the robot is able to comply with numerous tasks. Therefore perception has to be versatile. However, one single sensor cannot allow for all requirements. This work follows the strategy to design an inherently versatile sensor for a well-defined scenario: The *VR-SCAN* is dedicated to autonomous 3D modelling and exploration with a robot arm.

Growing autonomy in robotics requires robust perception working reliably in unforeseen and changing environmental conditions. The robot has to perform tasks without compromising itself or the environment.

The sensors requirements for autonomous modelling and exploration are analyzed. Two hypotheses regarding versatility and robustness are derived. The resulting requirements affect the design of the *VR-SCAN*: Versatility is ensured by large measuring depth and variable focusing. Confidence rating of each measurement provides robustness against false measurements. Therefore detection of safe-for-motion areas is possible.

High integration density is achieved by the use and development of very small components: The compact sensor system merges a MEMS micro mirror, a fiber coupled laser diode, a micro motor for focus control, a compact triplet lens and a central FPGA.

A patented calibration procedure is described and applied. Thus the functionality of the laser scanner is successfully demonstrated. The *VR-SCAN* combines outstanding features such as large measuring depth, robustness by confidence rating and high accuracy at close range in a small, lightweight package. Hence this robust and versatile sensor for robot perception complies with the stated hypotheses.

Keywords: Laser scanner, versatility, robustness, robotics

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Gliederung dieser Arbeit	4
2	Autonome 3D-Modellierung und Exploration mit einem Roboterarm	5
2.1	Bedarfsanalyse	5
2.2	Szenario	6
2.2.1	Roboterarm	7
2.2.2	Hand-Auge Konfiguration	8
2.2.3	Autonome Modellierung	9
2.2.4	Arbeitsraumexploration	11
2.2.5	Weitere Anwendungen	12
2.3	Zentrale Hypothesen	13
2.3.1	Robustheit	13
2.3.2	Vielseitigkeit	18
2.4	Schlussfolgerungen	21
3	Aktive optische Entfernungsmessung	23
3.1	Triangulation	23
3.1.1	Allgemeine Lasertriangulation	24
3.1.2	Einzelpunkt-Triangulationsscanner	27
3.1.3	Lichtschnitt	27
3.1.4	Musterprojektion	28
3.1.5	Passive Triangulation	29
3.2	Lichtlaufzeit und Phasenmessung	29
3.3	Techniken der Lichtablenkung (Scanner)	30
4	Stand der Technik	33
4.1	Systeme in Industrie und Forschung	33
4.1.1	Einzelpunktscanner	33
4.1.2	Lichtschnittsensoren	35
4.1.3	Musterprojektion	36
4.1.4	Lichtlaufzeit	37
4.1.5	Andere Messsysteme	38
4.2	Schlussfolgerungen	39

5	Entwicklung des VR-SCAN	41
5.1	Konstruktionsziele	41
5.1.1	Messbereich	42
5.1.2	Konfidenzbewertung der Messwerte	43
5.1.3	Größe und Gewicht	43
5.1.4	Genauigkeit	44
5.1.5	Messtakt und Auflösung	45
5.1.6	Lichtquelle und Augensicherheit	45
5.1.7	Schnittstellen	46
5.1.8	Zusammenfassung und Anforderungsliste	47
5.2	Konzept und Auslegung des VR-SCAN	48
5.2.1	Aktive Triangulation	49
5.2.2	MEMS Mikrospiegel	51
5.2.3	Indexmarke	58
5.2.4	Amplituden- und Phasenregelung	61
5.2.5	Detektor	62
5.2.6	Synchronisierung von Scanner und Detektor	63
5.2.7	Geometrische Auslegung	63
5.2.8	Empfangsoptik	64
5.2.9	Projektor	68
5.2.10	Fokussiereinrichtung	72
5.2.11	Bildprozessierung	74
5.2.12	Konfidenzbewertung der Messwerte	76
5.2.13	Systemdesign	78
5.2.14	Design	82
5.3	Der VR-SCAN	83
5.3.1	Gesamtsystem	83
5.3.2	Scankopf	85
5.3.3	Kamera	86
5.3.4	Elektronik	87
5.3.5	FPGA Implementierung	89
5.3.6	Design	90
6	Kalibrierung und Ergebnisse	93
6.1	Testaufbau	93
6.2	Kalibrierung	94
6.2.1	Grundlagen	95
6.2.2	Kalibrierverfahren	96
6.2.3	Durchführung einer Kalibrierung	98
6.3	Systematische Fehlereinflüsse	100
6.3.1	Laser Speckle	100
6.3.2	Triangulation	103
6.3.3	Scanner	105
6.3.4	Schlussfolgerungen	106

6.4	Verifikation	107
6.4.1	Gewindestange	107
6.4.2	Büste	108
6.5	Ergebnisse	109
6.5.1	Robustheit	110
6.5.2	Vielseitigkeit	110
7	Zusammenfassung	113
7.1	Zusammenfassung	113
7.2	Ausblick	114
A	Optik	117
A.1	Grundlagen	117
A.2	Schärfentiefe	117
A.3	Gauß-Strahl	118
A.4	Lambertsches Gesetz	119
A.5	Objektiv <i>VR-SCAN</i> 1:2,8/25	119
B	Bilder	121
B.1	Entfernungsmesser in Industrie und Forschung	121
C	Laserklassifizierung	123
	Literaturverzeichnis	125

Abbildungsverzeichnis

1.1	Autonome Modellierung und Exploration mittels eines Sensors am Roboterarm	3
2.1	Industrielle Roboterarme	7
2.2	Roboterarme in der Forschung	8
2.3	Studie handgeführter, mobiler Einsatz (Bilder: Tilo Wüsthoff)	13
2.4	Messsignal eines optischen Sensors	15
2.5	Robuste Klassifizierung der Messwerte	16
2.6	Multisensorsystem: DLR Co-Worker. Bild entnommen aus [47]	18
2.7	Vielseitige Sensorkonfigurationen: Roboter- und handgeführt	20
3.1	Prinzip der Lasertriangulation	24
3.2	Methoden der Lasertriangulation	28
3.3	Einfache Laserscanner	31
3.4	Synchronisierte Laserscanner	32
5.1	Messgeometrie <i>VR-SCAN</i>	50
5.2	MEMS Spiegel Typ DM1D	51
5.3	MEMS Antriebsprinzip	51
5.4	MEMS Schwingungsverlauf	54
5.5	MEMS Resonanzkurven	54
5.6	MEMS Spiegel Typ DM1D: Temperaturverhalten	57
5.7	Indexmarke	59
5.8	MEMS Spiegel Typ DM1D: Systemverhalten im Arbeitspunkt	61
5.9	MEMS Amplituden- und Phasenregelung	62
5.10	Objektiv <i>VR-SCAN</i> 1:2.8/25	68
5.11	Projektor	68
5.12	Schärfentiefe und Blendenzahl	73
5.13	Prozessierung des Messpunktbildes (Peak) auf dem Detektor	75
5.14	Berechnung des Konfidenzwertes der Freiraummessung K_{frei}	78
5.15	Systemdesign <i>VR-SCAN</i>	79
5.16	Der DLR <i>VR-SCAN</i>	84
5.17	Der <i>VR-SCAN</i> Prototyp	85
5.18	FEM Analyse der thermischen Ausdehnung des Rahmens	86
5.19	Querschnitt durch den <i>VR-SCAN</i> Prototyp	87
5.20	Fokussiereinrichtung	88

Abbildungsverzeichnis

5.21	Der <i>VR-SCAN</i> als handgeführter Sensor	91
6.1	Prüfstand zur Integration und Kalibrierung	94
6.2	Kalibrierverfahren des <i>VR-SCAN</i>	97
6.3	Kalibrierung des <i>VR-SCAN</i> mit bekanntem sinusförmigen Tiefenprofil . .	99
6.4	Laser Speckle (Unscharfes Bild eines Laserspots aufgenommen mit einer Canon EOS1)	101
6.5	Messfehler Δp aufgrund Speckle: Vergleich Laser - SLD	102
6.6	Messfehler bei der Triangulation aufgrund von lokalen Unterschieden in Reflektivität und Form	104
6.7	Gewindebolzen (Länge 200 mm, Steigung 5 mm)	107
6.8	Vermessung eines Gewindebolzens	108
6.9	Vermessung einer Büste, Punktwolke	109
B.1	Aktive optische Entfernungsmesser in Industrie und Forschung (1)	121
B.2	Aktive optische Entfernungsmesser in Industrie und Forschung (2)	122

Tabellenverzeichnis

2.1	Bedarfsanalyse zu einem neuen Sensor zur Entfernungsmessung	6
2.2	Sensor-Konfigurationen	9
2.3	Wahrheitsmatrix der Sensordatenaufnahme	14
2.4	Anforderungssatz Vielseitigkeit 1: Anwendungen Modellierung und Exploration	19
2.5	Anforderungssatz Vielseitigkeit 2: Sensorkonfigurationen	20
3.1	Optische Entfernungsmesser: Klassifizierung nach Messtiefe und Genauigkeit	23
4.1	Einzelpunktscanner	34
4.2	Lichtschnittsensoren	35
4.3	Musterprojektionssensoren	36
4.4	Lichtlaufzeit (ToF) Sensoren	38
4.5	Andere optische Entfernungsmesser	39
5.1	Anforderungen an den <i>VR-SCAN</i>	47
5.2	MEMS Mikrospiegel: Technische Daten	52
5.3	Modellierung des MEMS Mikrospiegel: Zahlenwerte	56
5.4	Geometrieparameter des <i>VR-SCAN</i>	64
5.5	Anforderungen Sammeloptik	67
6.1	Messgrößen, Parameter und Modellgrößen des <i>VR-SCAN</i>	96
6.2	Technische Daten des <i>VR-SCAN</i>	110
A.1	Technische Daten Objektiv <i>VR-SCAN</i> 1:2,8/25	120

1 Einleitung

Maschinelle Wahrnehmung ist ein wesentlicher Teil der Automatisierungstechnik und Robotik. Während die innere Wahrnehmung, wie Motor- und Positionssensorik, für die Maschine als Selbstzweck für die eigene, koordinierte Bewegung unabdingbar ist, gewinnt die sichere Lokalisierung und Orientierung in der Umgebung mit wachsender Autonomie immer mehr an Bedeutung. Der Begriff „autonom“ (oder auch „teilautonom“) Roboter ist sehr weitläufig und schwer allgemein zu definieren. Oft wird der Begriff „autonom“ fälschlicherweise synonym mit „automatisch“ verwendet. Gemäß unseres Idealbildes aus Science-Fiction-Literatur und Film ist ein oft humanoider Roboter vollständig autonom in dem Sinne, dass er sich ganz selbstverständlich in komplexer Umgebung zurechtfindet und mit ihr interagiert, ebenso wie er mit Menschen zusammenarbeitet. Oft ist dabei der Roboter in seiner Wahrnehmung dem Menschen klar überlegen. In der heutigen Realität sind wir davon jedoch weit entfernt. Die meisten Roboter sind in der Tat Automaten, die sich immerzu gleich und vorhersehbar bewegen. Es stellt sich also die Frage, wo Autonomie beginnt. Der Sensorik und der Auswertung und Interpretation der Daten kommt hier die entscheidende Rolle zu: Nach Franklin und Graesser [41] ist ein Roboter dann ein autonomer Agent, wenn er seine Umgebung wahrnimmt und geplante Handlungen darin vornimmt.¹ In mindestens teilweise unbekannter oder veränderlicher Umgebung ist also äußere Wahrnehmung notwendig, um dem Roboter Entscheidungen zu ermöglichen. Bevor er sich in Bewegung setzt, muss ein Weltmodell erstellt oder aktualisiert werden. Neben dieser sogenannten *Exploration* des Bewegungsraumes müssen unbekannte Gegenstände *modelliert* werden, um sie greifen und manipulieren zu können. Die äußere Wahrnehmung, also insbesondere die Erfassung und Interpretation der dreidimensionalen Umgebung, ist daher Grundvoraussetzung für autonome Bewegung und Interaktion in der Realität.

1.1 Problemstellung

Menschen und Tiere, als hoch entwickelte autonome Agenten, verfügen über mehrere, völlig verschiedene Sinne, so dass sie sich mit hoher Wahrscheinlichkeit auch unter schwierigen Bedingungen zurechtfinden können. Bei Dunkelheit rückt beispielsweise der

¹„An autonomous agent is a system situated within and a part of an environment that senses that environment and acts on it, over time, in pursuit of its own agenda and so as to effect what it senses in the future.“ [41]

1 Einleitung

Hör- und Tastsinn stärker in den Vordergrund und ersetzt die sonst oft primär verwendete visuelle Wahrnehmung. Völlige Handlungsunfähigkeit ist durch die Kombination und situationsbedingte Gewichtung verschiedener Wahrnehmungstechniken nahezu ausgeschlossen. Die unterschiedlichen Sinne führen also zu ausreichender Robustheit gegen fehlende oder fehlerhafte Informationen und garantieren eine sehr hohe Vielseitigkeit. Ein Roboter steht mit wachsendem Autonomielevel vor ähnlichen Herausforderungen, insbesondere dann, wenn er die strukturierte Umgebung des Labors verlässt.

Daher liegt es nahe, in der Robotik auch mehrere unterschiedliche Messsysteme gleichzeitig zu verwenden, um deren individuelle Stärken für verschiedene Anwendungen zu nutzen und die Robustheit zu erhöhen [67]. Gleichzeitig ergeben sich je nach Aufgabe des Roboters, Einsatzgebiet und Grad der Autonomie stark unterschiedliche und teils widersprüchliche Anforderungen an die Sensoren. Zu den Aufgaben zählen neben 3D-Modellierung und Exploration auch Objekterkennung, Tracking, visual Servoing, Hinderniserkennung, Arbeitsraumüberwachung und viele mehr. Ein einzelner Sensor kann also kaum alle Anforderungen erfüllen, die die verschiedenen Perzeptionsaufgaben² stellen. Ein Multisensorsystem ist folglich sowohl hinsichtlich der erforderlichen Robustheit als auch aufgrund der vielfältigen Anforderungen der Anwendungen sinnvoll. In [94] wird mit dem DLR-3D-Modeller ein solches System vorgestellt, welches im Vorfeld dieser Arbeit entstand.

Für die (berührungslose) äußere Wahrnehmung sind insbesondere optische Prinzipien vorherrschend. Andere Verfahren, wie Radar, Tast- oder Ultraschallsensoren werden in dieser Arbeit nicht behandelt. Es steht eine Vielzahl unterschiedlicher optischer Sensoren zur Verfügung, wie beispielsweise (Stereo-)Kameras, Laserscanner, Streifenprojektionsensoren oder ToF³-Kameras. Die Sensoren unterscheiden sich hinsichtlich Genauigkeit, Reichweite, Messtiefe, Blickfeld, Datenrate, Messprinzip und Preis. Durch die Kombination von Sensoren kann zwar naturgemäß nahezu jede beliebige Anforderung an die Wahrnehmung abgedeckt werden, es erhöhen sich aber die Kosten und die Komplexität und es werden viele Ressourcen (Platz und Gewicht) benötigt. Aus diesem Grund muss die Sensorauswahl an den Einsatzzweck und das Autonomielevel des Roboters angepasst werden, so dass der gewünschte Grad an Robustheit und Vielseitigkeit gewährleistet ist. Insbesondere bei kleinen, leichten Robotern mit geringem Platzangebot und niedriger Nutzlast kann dies zu Konflikten führen.

Ein Industrieroboter ist nach der VDI-Richtlinie 2860 wie folgt definiert:

„Industrieroboter sind universell einsetzbare Bewegungsautomaten mit mehreren Achsen, deren Bewegungen hinsichtlich Bewegungsfolge und Wegen bzw. Winkeln frei (d. h. ohne mechanischen Eingriff) programmierbar und gegebenenfalls sensorgeführt sind. Sie sind mit Greifern, Werkzeugen oder ande-

²Perzeption ist der Gesamtprozess aus Wahrnehmung (Sensorinformation) und Interpretation der Wahrnehmung

³Time-of-Flight (Laufzeit)

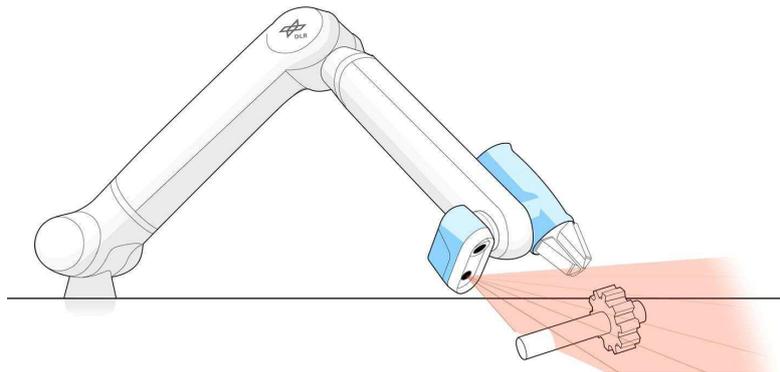


Abbildung 1.1: Autonome Modellierung und Exploration mittels eines Sensors am Roboterarm

ren Fertigungsmitteln ausrüstbar und können Handhabungs- und/oder Fertigungsaufgaben ausführen.“ [100]

Zentrale Merkmale sind demnach die universelle Einsetzbarkeit und die freie Bewegungsfolge. Aufgrund seiner Bewegungsfreiheit ist es oft sinnvoll, Sensoren für die Perzeption am TCP⁴ des Roboters zu befestigen (Hand-Auge Konfiguration), um diese in die Richtung oder an den Ort des Interesses bewegen zu können, siehe Abbildung 1.1. Dabei entsteht ein Dilemma bezüglich der Auswahl der Sensorik: Maximale Vielseitigkeit lässt sich wie o. a. nur über die Kombination mehrerer spezialisierter Sensoren erreichen. Das führt zu einem Konflikt zwischen hoher Vielseitigkeit und hohem Aufwand bei der Perzeptionssensorik, was den eigentlichen Arbeitszweck (Nutzlast) des Roboters einschränkt. Insbesondere in der Leichtbaurobotik [50, 51, 79] ist der Platz und die Last noch stärker begrenzt, weshalb in der Praxis meist nur ein Sensor verwendet wird, was den Einsatz auf bestimmte Aufgaben limitiert. Ohne Wechsel der Sensoren verliert damit der Roboter wiederum einen Teil seiner definitionsgemäßen Vielseitigkeit. Ziel dieser Arbeit ist es, diesen Konflikt durch die Entwicklung eines vielseitigen sowie kompakten Sensors abzumildern.

Die folgenden zwei Aspekte sind daher als Paradigmen dieser Arbeit hervorzuheben:

- Ein autonomer Roboter muss über eine *robuste*, also unter den auftretenden Bedingungen verlässliche, äußere Wahrnehmung verfügen, um handlungsfähig zu bleiben und Schäden an Umwelt und sich selbst auszuschließen.
- Ein Roboter ist ein *vielseitiges* Werkzeug und soll verschiedene Aufgaben erfüllen können. Die Wahrnehmung ist daher auf Sensoren angewiesen, die eine vielseitige Perzeption ermöglichen.

⁴Tool Center Point (Werkzeugposition am Roboter)

1 Einleitung

Daraus ergibt sich die folgende Problemstellung:

Es soll durch die gezielte Entwicklung eines optischen Sensors für autonome Exploration und Modellierung mittels eines Roboterarms das Verhältnis von Vielseitigkeit und Robustheit zu Gewicht, Größe und Komplexität optimiert werden.

Es soll gezeigt werden, dass bereits die Sensorentwicklung ein wichtiger Baustein der Perception in der Robotik ist. Die Abgrenzung eines sinnvollen Aufgabenbereichs ist dazu notwendig. Das betrachtete Anwendungsszenario ist autonome 3D-Modellierung und Exploration mittels eines Leichtbauroboters und eines Sensors in Hand-Auge Konfiguration (Abbildung 1.1). In diesem Szenario ist die Umgebung statisch und teilweise unbekannt. Der Roboter soll abstrakt formulierte Aufgaben erledigen und dazu die freien Bereiche seines Bewegungsraumes erfassen und die zu manipulierenden Gegenstände modellieren. Der direkt am TCP angebrachte Sensor soll vielseitig und robust sein: *VR-SCAN*.

1.2 Gliederung dieser Arbeit

Die Arbeit ist wie folgt gegliedert: Kapitel 2 beschreibt das Szenario der autonomen Modellierung und Exploration mit einem Roboterarm, insbesondere unter Betrachtung der Anforderungen an Robustheit und Vielseitigkeit an die Sensorik in einer Hand-Auge Konfiguration. Die Grundlagen der aktiven optischen Entfernungsmessung werden in Kapitel 3 erläutert. In Kapitel 4 wird ein Überblick über den Stand der Technik im Bereich optischer Messsysteme gegeben. In Kapitel 5 werden, ausgehend vom Stand der Technik, die Konstruktionsziele und Anforderungen an einen neuen Laserscanner formuliert. Die Entwicklung und Implementierung des *VR-SCAN* wird ausführlich beschrieben. Kapitel 6 stellt den Messaufbau vor und leitet die Kalibriermethode her. Es werden die Fehlereinflüsse auf den Sensor diskutiert und Ergebnisse präsentiert. In Kapitel 7 wird die Arbeit zusammengefasst.

2 Autonome 3D-Modellierung und Exploration mit einem Roboterarm

In diesem Kapitel wird das Szenario *Autonome 3D-Modellierung und Exploration mit einem Roboterarm* beschrieben. Ausgehend von diesem Szenario und den damit möglichen Anwendungen werden Hypothesen aufgestellt, wie ein hierfür geeigneter Hand-Auge Sensor idealerweise beschaffen sein sollte.

Grundlegend für die Definition des Szenarios ist eine Bedarfsanalyse zu optischer Abstandsmessung in der Robotik, welche am Institut für Robotik und Mechatronik (RM) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) durchgeführt wurde (Abschnitt 2.1). In Abschnitt 2.2 wird davon ausgehend das Szenario eingegrenzt und mögliche Applikationen dargelegt. In Abschnitt 2.3 werden daraus schließlich die Hypothesen abgeleitet, die als Grundlage für die Entwicklung des *VR-SCAN* dienen. Die Schlussfolgerungen aus diesem Kapitel sind in Abschnitt 2.4 zusammengefasst.

2.1 Bedarfsanalyse

Am Institut RM des DLR wird seit Anfang der 90er Jahre an Abstandssensorik geforscht, insbesondere wurden verschiedene Laser-Abstandssensoren und Laserscanner entwickelt [46, 52]. Es existierte kein einzelner visueller Sensor, der alle Anwendungen in der Robotik gleichermaßen abdeckt (vgl. auch Kapitel 4). Aus diesem Grund wurde der 3D-Modellierer (3DMo) als multisensorielles Sensorsystem entwickelt [94]. Gleichzeitig kam auch der Wunsch nach einer Neuentwicklung eines einzelnen Sensors auf, der vielseitig genug ist, um möglichst viele Anwendungsfelder abzudecken. Im Jahr 2007 führte der Autor in zahlreichen Gesprächen mit den Anwendern und Entwicklern optischer Sensoren am Institut eine Bedarfsanalyse durch, um die Anforderungen an solch ein neues System zu ermitteln. Dabei wurde von den Erfahrungen mit dem 1997 am Institut entwickelten DLR Laser Range Scanner (LRS)[46] ausgegangen, das Messprinzip des neuen Sensors aber bewusst offen gelassen.

Tabelle 2.1 fasst die Forderungen und Wünsche der Anwender zusammen. Die Tabelle wurde bewusst unstrukturiert belassen, um die breitgefächerten, teils divergierenden Vorstellungen an einen neuen Sensor wiederzugeben. Es werden sowohl konkrete technische Anforderungen, als auch Zielapplikationen genannt. Die vielen unterschiedlichen Anwendungen stehen für die Vielfalt der am Institut bearbeiteten Themen. Ein neuer Sensor soll daher vielseitig sein, gleichzeitig muss der Anwendungsbereich jedoch auf ein

Tabelle 2.1: Bedarfsanalyse zu einem neuen Sensor zur Entfernungsmessung

Applikationen	Patientenmodellierung, Scannen einer Mundhöhle, Patientenregistrierung, Tracking, autonome Modellierung, Objekterkennung, Szenenanalyse
Größe, Gewicht	klein und leicht für Leichtbauroboter
Messbereich	ca. 250–1500 mm je nach Anwendung, 2,5 D Messwerte nützlich
Genauigkeit	0,1% des Messabstandes (1 mm bei 1000 mm Entfernung, 0,1 mm im Nahbereich)
Robustheit	gegenüber verschiedenen Oberflächen, Laserintensitätsanpassung ist ein wichtiges Feature, Reflektivitätswert für jeden Messpunkt
Blickwinkel	geringer als 270°
Messdimension	2D, 2,5 D wünschenswert
Messtakt	> 10 kHz Punktrate
Sonstiges	Sterilisierbarkeit, mechanische Robustheit, leichte Bedienbarkeit

klar definiertes Szenario eingegrenzt werden. Im folgenden Abschnitt wird dieses Szenario eingehend beschrieben. Naturgemäß können dabei nicht alle Punkte aus Tabelle 2.1 berücksichtigt werden. Einig war man sich darin, dass der neue Sensor, gegenüber den bisher verwendeten Sensoren im Institut, genauer bei gleichzeitig größerem Messbereich sein soll. Außerdem wurde Wert auf Robustheit und geringe Größe gelegt. Damit war die Idee zum *VR-SCAN* geboren.

2.2 Szenario

Inspiziert von der Bedarfsanalyse im vorigen Abschnitt wird ein Szenario angenommen, in dem ein Leichtbau-Roboterarm in mindestens teilweise unbekannter Umgebung selbstständig abstrakt vordefinierte Handlungen ausführt. Die Umgebung ist über den Zeitraum der Arbeit als statisch anzusehen, kann jedoch zwischen den Arbeitsschritten verändert werden. Der Sensor zur Wahrnehmung der Umgebung ist neben dem Manipulator am TCP¹ als Hand-Auge Sensor angebracht (vgl. Abbildung 1.1). Der Roboter beginnt seine Arbeit mit einer relativ groben und schnellen Exploration der Umgebung, um effektiv Hindernisse und Freiräume zu erkennen. Damit erweitert er seinen Konfigurationsraum mit kollisionsfreien Posen, um sichere Bewegungen zu ermöglichen. Gleichzeitig werden die zu manipulierenden Objekte lokalisiert und in Folge in hoher Präzision modelliert. Dadurch ist deren genaue Lage bekannt und es können die erforderlichen Handlungen geplant und ausgeführt werden (z. B. Greifen nach erfolgter Greifplanung).

¹Der TCP eines Roboters ist nicht einheitlich definiert. In dieser Arbeit ist mit TCP kein eindeutiger Punkt, sondern allgemein die Werkzeugposition am letzten Glied der kinematischen Kette eines seriellen Roboters gemeint.



(a) ABB IRB 2400, nach eigenen Angaben der weltweit meist eingesetzte Industrieroboter seiner Art [2], Bild: ABB



(b) KUKA LBR iiwa, Leichtbauroboter mit Momentensensorik [64], Bild: KUKA

Abbildung 2.1: Industrielle Roboterarme

Dieses Szenario ist denkbar in kleinen und mittleren Unternehmen, die häufiger wechselnde Arbeiten vom Roboter erledigen lassen wollen, und wo es gleichzeitig keine klar strukturierten Arbeitszellen gibt.

In den folgenden Abschnitten wird dieses Szenario detailliert diskutiert und werden für den Sensor relevante Randbedingungen herausgearbeitet.

2.2.1 Roboterarm

Die Bauform als Arm mit sechs oder sieben seriellen Freiheitsgraden ist eine weit verbreitete Art von Robotern. Viele Hersteller von Industrierobotern (u. a. KUKA, ABB, Fanuc, Reis) nutzen diese Kinematik, sowohl als klassischer Industrieroboter als auch als Leichtbauroboter (vgl. Abbildung 2.1). In Analogie zum menschlichen Arm ist er flexibel und intuitiv einsetzbar. Er grenzt sich dadurch von anderen, spezielleren Konfigurationen wie z. B. Parallelkinematiken ab, welche in erster Linie auf Geschwindigkeit und Präzision ausgelegt sind. Die Einsatzgebiete von Roboterarmen sind dementsprechend vielfältig: Sie erfüllen in der industriellen Fertigung Aufgaben wie Transport, Manipulation oder Montage, meist in fest programmierten Bewegungsabläufen. Die Roboter können prinzipiell jederzeit an andere Aufgaben angepasst werden, häufig verbunden mit dem Tausch des Werkzeugs an der Spitze des Armes (TCP).

In der Forschung und Entwicklung sind Roboterarme ebenfalls sehr verbreitet [50, 51, 79], vgl. Abbildung 2.2. Vorteilhaft sind sieben Freiheitsgrade, um durch Nullraum-

2 Autonome 3D-Modellierung und Exploration mit einem Roboterarm



(a) DLR MIRO, 7-achsiger Medizinroboter mit Momentensensorik [50], Bild: DLR



(b) Barrett WAM™ Arm [10, 79], Bild: Barrett Technology

Abbildung 2.2: Roboterarme in der Forschung

Bewegungen eine Redundanz und höhere Geschicklichkeit der Bewegungen zu erreichen.

Aufgrund der langjährigen Expertise am DLR Institut für Robotik und Mechatronik und der zunehmenden Bedeutung in der Industrie wird im Szenario, das dieser Arbeit zugrunde liegt, ein Leichtbauroboterarm vom Typ LBR oder KUKA iiva verwendet. In Folge ist daher mit „Roboter“ im Allgemeinen ein Leichtbauroboter gemeint.

2.2.2 Hand-Auge Konfiguration

Ist der 3D-Sensor am TCP des Roboters befestigt, spricht man von Hand-Auge Konfiguration (vgl. Abbildung 1.1). Der Roboterarm bestimmt Position und Richtung der Datenaufnahme durch seine Pose. Der Sensor ist somit das Werkzeug des Roboters. Diese Konfiguration wird auch aktive Perzeption („active vision“) genannt [3, 25]. Alternativ dazu befindet sich der Sensor an einer externen Position im Raum und beobachtet die Szene von außen. Dabei kann er ebenfalls beweglich sein, wie beispielsweise durch einen Dreh- und Schwenkkopf, um die räumliche Abdeckung zu erweitern.

Ein großer Vorteil der Hand-Auge Konfiguration ist die Mobilität des Sensors im gesamten Arbeitsraum des Roboters. Überdeckungen und Hinterschneidungen können umfahren werden, sofern der Bewegungsraum des Roboters dies zulässt. Zudem variieren die wahrzunehmenden Objekte in Größe und Abstand, so dass eine aktive Bewegung des Sensors nötig ist. Für ein vollständiges 3D-Modell muss ein Objekt von verschiedenen Seiten betrachtet werden. Aktive Perzeption mit einem Hand-Auge Sensor ist also für die autonome Modellierung unverzichtbar. Daraus ergeben sich weitere Aspekte: Die Reich-

Tabelle 2.2: Sensor-Konfigurationen

Merkmal	Hand-Auge Sensor	externer Sensor
Reichweite	Arbeitsraum + Sensorreichweite	Sensorreichweite
Sensorpräzision	durch Nähe zum Objekt steuerbar	fest
Sichtbarkeit der Szene	nur durch Konfigurationsraum des Roboters begrenzt	limitiert durch Sensor-Blickfeld und Hinter-schneidungen und Verdeckungen
Modellierungspräzision	Sensorpräzision + Positioniergenauigkeit des Roboters	Sensorpräzision (+ ggf. Positioniergenauigkeit der Aktuierung)
Nutzlast und Geschicklichkeit	durch Sensorgewicht und -größe vermindert	unbeeinflusst

weite² des Sensors muss nicht die gesamte Szene abdecken, da der Sensor vom Roboter an den Ort des Interesses bewegt wird. Somit ist die gewünschte Präzision der Modellierung durch Nähe zum Objekt steuerbar. Zudem sind erreichbare und manipulierbare Objekte gleichzeitig auch modellierbar, und es ist kein großes Blickfeld notwendig.

Die Hand-Auge Konfiguration hat großen Einfluss auf die Konstruktion des Sensors, vgl. Tabelle 2.2. Er muss klein und leicht sein, um die Nutzlast nicht zu stark zu verringern, und kommt gleichzeitig mit reduzierter Reichweite, Präzision und Blickwinkel aus.

Zur Modellierung eines Objektes ist es darüber hinaus ebenfalls denkbar, dass der Roboter das Objekt vor einem im Raum fixierten Sensor bewegt. Damit wird allerdings nicht das Problem gelöst, wie der Roboter den zuvor unbekanntem Gegenstand greifen soll und wo sich dieser befindet. Außerdem sind Verdeckungen durch den Greifer zu erwarten. Diese Konfiguration sei daher nur der Vollständigkeit halber erwähnt, für einen autonomen Modellierer erscheint sie untauglich.

2.2.3 Autonome Modellierung

Der Bedarf an 3D-Modellen unserer Umwelt sowie einzelner Gegenstände ist groß. Viele Objekte, wie technische Teile, Gegenstände aus dem täglichen Gebrauch oder der Vergangenheit werden für unterschiedliche Zwecke digitalisiert: Mit Manipulation, Greifplanung, Inspektion, Reproduktion, Objekterkennung und Registrierung, Sicherung kulturellen Erbes, Ausstellung zur Unterhaltung, Bildung oder aus kaufmännischem Interesse sind einige dieser Anwendungen angeführt.

²maximale Entfernung, bis zu welcher Messungen möglich sind.

Ein vollständiges 3D-Modell eines komplexen Gegenstandes zu erstellen ist sehr zeitintensiv. Das Modell muss von verschiedenen Seiten erfasst werden, um Verdeckungen und Hinterschneidungen einsehen zu können. Zudem ist der Blickwinkel der Sensoren oft zu klein, um das gesamte Objekt erfassen zu können. Es wird also im Allgemeinen aus mehreren Einzelaufnahmen aus unterschiedlichen Blickwinkeln und Richtungen zusammengesetzt [25]. Entweder wird dazu das unbewegliche Objekt in einem aufwendigen und starren Aufbau von allen Seiten erfasst [103] oder es wird sequentiell abgetastet [65]. Bei kleinen und weniger komplexen Gegenständen kann dazu das Objekt vor einem stillstehenden Sensor bewegt (z. B. gedreht) werden [107]. Bei komplexeren, in der Größe variierenden Teilen, ist es jedoch üblich, den Modellierer (z. B. einen Laserscanner) um das Objekt zu bewegen. Die Position des Modellierers muss dabei laufend ermittelt werden, was auf verschiedene Arten erfolgen kann: Absolute Lagemessung kann mittels eines Armes (passiv oder Roboterarm) oder eines Trackingsystems erfolgen [90, 93]. Zunehmend findet auch odometrische (relative) Lageschätzung mit laufender globaler Optimierung Anwendung, z. B. aus Kamerabildern [91], oder einer IMU³ [23].

Der Bewegung des Modellierers um das Objekt kommt eine Schlüsselrolle zu, denn für eine effektive Datenaufnahme muss eine Vielzahl von Einflussfaktoren berücksichtigt werden: Größe, Form und Entfernung des Objektes, Reichweite des Armes und des Sensors, Aufnahmerichtung, Lichtverhältnisse, und viele mehr. Daher wird in der Praxis bis heute der Sensor oft vom Menschen handgeführt. Ziel ist es jedoch, diese anspruchsvolle, aufwendige, langwierige und oft auch körperlich anstrengende Arbeit autonom von Robotern erledigen zu lassen.

Ein autonomer Modellierer muss in der Lage sein, selbstständig 3D-Modelle seiner Umwelt erstellen zu können. Grundvoraussetzung ist eine statische Umgebung, da das Modell im Allgemeinen nicht innerhalb der kurzen Zeitspanne einer Aufnahme erfasst werden kann. Die Szene muss also sequentiell abgetastet werden. Dazu ist die bestmögliche nächste Aufnahmeposition (next best view) und eine Trajektorie dorthin zu ermitteln. Der Roboter bewegt nun den Sensor in Hand-Auge Konfiguration (s. Abschnitt 2.2.2) unter Vermeidung von Kollisionen [25, 63, 75]. Mit präziser Kenntnis der Pose des Sensors im globalen KS (absolut und/oder odometrisch gemessen) kann das 3D-Modell laufend aktualisiert werden [22].

Der Roboter als autonomer Modellierer wird damit einerseits zum Dienstleister für den Menschen, profitiert jedoch andererseits auch selbst von dieser Fähigkeit, indem erst sie ihm autonome physische Interaktion mit seiner Umgebung ermöglicht, z. B. als humanoider Serviceroboter [74].

Das Szenario *Autonome 3D-Modellierung mit einem Roboterarm* wird nun folgendermaßen eingegrenzt: Ein Roboterarm ist am TCP mit einem Sensor ausgerüstet, um automatisch dreidimensionale Objekte in ausreichender Genauigkeit zu erfassen. Der Roboter bewegt den Sensor um das unbewegte Objekt, und die Pose des Sensors muss während der Messung durch die Roboterposition oder externes Tracking bekannt sein.

³Inertial Measurement Unit (Intertialsensor)

Es muss hauptsächlich der Nahbereich erfasst werden, da der Sensor aktiv an den Ort des Interesses bewegt wird. Für Manipulation und Greifplanung ist zudem hohe Präzision erforderlich.

2.2.4 Arbeitsraumexploration

Exploration ist die Erkundung einer unbekannter Umgebung, um eine sichere, kollisionsfreie Bewegung zu ermöglichen und Objekte von Interesse (z. B. zur anschließenden Modellierung) zu lokalisieren. In der heutigen Industrierobotik ist die Arbeitsumgebung normalerweise bekannt und der Roboter arbeitet meist in eng definierten Aufgabenbereichen. Die Grenze zur reinen Automation ist schwammig. In flexiblerer Umgebung, wie bei der Fertigung von geringen Stückzahlen, oder auch in der Servicerobotik, steigt die Unsicherheit stark an: Der Arbeitsraum wird häufiger verändert und der Aufwand, diesen aufgeräumt und sicher zu halten, sowie dem Roboter stets ein aktuelles Modell davon zur Verfügung zu stellen, übersteigt schnell den Nutzen, den der Einsatz eines Roboters bringt. Folglich muss ein vielseitig eingesetzter Roboter autonom agieren und daher zur selbstständigen Exploration fähig sein.

Dabei steht zunächst die Erfassung des Freiraums im Vordergrund, in dem sich der Roboter gefahrlos bewegen kann. Michael Suppa stellte 2007 Strategien zur autonomen Arbeitszellenexploration mit multisensoriellen Hand-Auge Systemen vor [92]. Die dort formulierten Gedanken werden in dieser Arbeit aufgegriffen und daraus Anforderungen an einen neuen Sensor erarbeitet, der als Explorationswerkzeug geeignet ist.

Exploration des Konfigurationsraumes

Bevor der Roboter sich in Bewegung setzt, müssen kollisionsfreie Konfigurationen bekannt sein. Eine Bewegung ist der Übergang zwischen zwei Konfigurationen, also muss ebenfalls der Raum dazwischen frei sein. Dabei muss die Trajektorie aller bewegter Achsen sowie die gesamte Roboterstruktur berücksichtigt werden. Es kann beispielsweise der Fall auftreten, dass der TCP ungehindert bewegt wird, während ein anderer Teil des Roboters kollidiert. Ziel der Exploration ist demnach die Maximierung des Konfigurationsraumes und damit der Beweglichkeit. Hindernisse und freie Räume sollen erkannt werden.

Zwei Möglichkeiten können während der Exploration auftreten: Es wird ein Hindernis erkannt und der Raum zwischen Sensor und Hindernis ist somit frei. Wenn sich kein Hindernis in Sensorreichweite befindet, soll der Roboter weiter in den freien Raum vordringen. Diese Art der Wahrnehmung wird Freiraummessung genannt. In beiden Fällen ist robuste Klassifizierung und Bewertung der Sensorwerte erforderlich, um das Auftreten falscher Messergebnisse zu minimieren. Insbesondere wenn nichts gemessen wird, kann eine Messung nur dann *richtig negativ* sein, wenn es eine Qualitätsbewertung gibt (vgl. Kapitel 2.3.1 und Abbildung 2.5).

Große Messtiefe⁴ und großer Sichtbereich sind weitere Kriterien für einen Explorations-sensor, um die Dauer der Exploration zu minimieren. Idealerweise deckt die Messtiefe den gesamten Arbeitsraum des Roboters ab. Die Präzision des Sensors ist zweitrangig, da lediglich Hindernisse erkannt werden sollen. Dies gilt speziell im Fernbereich, der für die schnelle Exploration besonders interessant ist.

Exploration der Umgebung

Die Beweglichkeit des Roboters wird mit zunehmender Kenntnis des Konfigurations-raumes größer, wodurch er weiter in den Raum vordringen und schließlich Hindernisse, Begrenzungen und Zielobjekte detektieren kann. Die Modellierung muss je nach Zweck unterschiedlich genau sein, wobei Hindernisse weniger präzise als die Zielobjekte zur Manipulation erfasst werden müssen (vgl. Abschnitt 2.2.3 und Tabelle 2.4).

2.2.5 Weitere Anwendungen

Medizin

Außerhalb des industriellen Umfelds gibt es weitere Bereiche, in denen der Einsatz eines robusten und vielseitigen Laserscanners Vorteile bringt: Exemplarisch sei hier die Medizintechnik aufgeführt. Mögliche Applikationen gibt es z. B. in der Patientenregistrierung in der robotergestützten minimal invasiven Chirurgie [49, 84]. Auch im Bereich der bildgebenden Elektromyographie ist ein Laserscanner von Nutzen, um die genauen Elektrodenpositionen zu vermessen [99].

Handgeführte und mobile Modellierung

Am Roboter sind die Sensoren oft nicht der Hauptzweck und konkurrieren mit den Manipulatoren um Platz und Nutzlast. Daher sollen auf Roboter montierte Sensoren klein und leicht sein, insbesondere als Hand-Auge System. Wird der Sensor von einem Menschen handgeführt, gilt ähnliches. Hohes Gewicht ist insbesondere beim Scannen über Kopf auf Dauer sehr anstrengend. Folglich sind diesbezüglich die Entwicklungsziele für Hand-Auge Systeme, ob hand- oder robotergeführt, in vielen Bereichen ähnlich. Aufgrund dieser Synergien ist der *VR-SCAN* grundsätzlich auch für den mobilen handgeführten Einsatz geeignet, insbesondere in schwer zugänglichen Bereichen. Dies kann in der freien Natur (Forensik, Archäologie, Geologie), bei Modellierung in großer Höhe (Denkmalpflege) oder in engen Räumen sein. Exemplarisch sei hier das Digitalisieren von kulturellem Erbe [11, 45] genannt. Abbildung 2.3 zeigt Möglichkeiten des mobilen

⁴Distanz zwischen geringstem und größtem Messabstand



Abbildung 2.3: Studie handgeführter, mobiler Einsatz (Bilder: Tilo Wüsthoff)

Einsatzes, evaluiert im Rahmen einer Ergonomiestudie im Zuge der *VR-SCAN* Entwicklung [80]. In Kapitel 5.2.14 werden die Konstruktionsziele formuliert, die zusätzlich zum Roboterbetrieb berücksichtigt werden.

2.3 Zentrale Hypothesen

Im beschriebenen Szenario kristallisieren sich zwei zentrale Aspekte heraus, die Thema dieser Arbeit sind: Die *Robustheit* und *Vielseitigkeit* eines Hand-Auge Sensors, der an einem Roboterarm eingesetzt wird. Im Folgenden werden diese Begriffe diskutiert. Die aus dem Szenario abgeleiteten Hypothesen dienen in Kapitel 5 als Grundlage für die technologischen Anforderungen an die Entwicklung des *VR-SCAN*.

2.3.1 Robustheit

„Robustheit“ bedeutet Beständigkeit, Stabilität, Widerstandsfähigkeit.⁵ Aus technischer Sicht ist neben der physischen Stabilität vor allem die Widerstandsfähigkeit gegenüber äußeren Einflüssen hervorzuheben: Der Sensor muss zuverlässig und ausfallsicher, auch unter veränderlichen Umweltbedingungen (Beleuchtung, Temperatur, Feuchtigkeit, etc.), funktionieren.

Soll ein Roboter außerhalb des Labors unter nicht oder wenig kontrollierbaren Einflüssen autonom agieren, ist er auf robuste Datenaufnahme angewiesen. Ausfallsicherheit lässt

⁵aus Duden online: <http://www.duden.de/node/684018/visions/1165320/view> (besucht am 14.04.2015)

Tabelle 2.3: Wahrheitsmatrix der Sensordatenaufnahme

Fall	Bedeutung	Folgen
Richtig positiv	Objekt wird richtig gemessen	korrekte Modellierung
Richtig negativ	Freiraum wird richtig gemessen	korrekte Exploration des Bewegungsraumes
Falsch positiv	nicht vorhandenes Objekt wird gemessen	unnötige Einschränkung des Bewegungsraumes. Die Aufgabe kann evtl. nicht ausgeführt werden.
Falsch negativ	Objekt wird nicht gemessen	Kollisionen sind möglich.

sich u. a. durch Redundanz und Diversität mehrerer Systeme erreichen. Idealerweise sollen unter allen möglichen Bedingungen verlässliche Daten geliefert werden. Technisch ist dies kaum vollständig möglich, und auch in der Natur gibt es kein Sinnesorgan, welches ideal robust gegenüber allen Umwelteinflüssen ist. Nun stellt sich die Frage, was bei ungünstigen Bedingungen passieren könnte. Problematisch ist vor allem der Übergangsbereich zwischen „Datenaufnahme gerade noch möglich“ und „keine Datenaufnahme mehr möglich“. Es besteht die Gefahr von fehlerhaften Messungen. Während falsch positive Ergebnisse den Roboter in seiner Bewegung unnötig einschränken, weil z. B. fehlerhafte Messwerte ein Hindernis dort vorgaukeln, wo keines ist, können falsch negative Messungen gefährlich sein: Mögliche Hindernisse werden nicht erfasst, was zu unbeabsichtigten Kollisionen führen kann (vgl. Tabelle 2.3).

Welche Möglichkeiten gibt es also, falsche Ergebnisse zu verhindern und damit die Robustheit zu erhöhen? Es existieren zahlreiche Ansätze, Sensordaten aus dem Kontext der Anwendung heraus im Nachhinein zu filtern, zu bewerten und in einen örtlichen oder zeitlichen Zusammenhang zu bringen [23, 96], [87] Part A 4.3. Große Datenmengen, häufig aus mehreren (unterschiedlichen) Sensoren, fließen in die Auswertung ein, und zusammen ergibt sich ein auf Glaubwürdigkeit überprüfter übergeordneter Sinn, wie z. B. eine Karte, mit deren Hilfe der Roboter verlässlich navigieren kann.

MacKinnon u. a. fassen in einem Review [68] verschiedene Ansätze zur Qualitätsbewertung von Entfernungsmessdaten zusammen: Die untersuchten Bewertungen basieren auf der Messunsicherheit, Signalintensität, Entfernung und Nachbarschaft anderer Daten. Es wird die gewichtete Kombination dieser Qualitätsbewertungen zu einem allumfassenden Qualitätsmaß der Messung angestrebt.

Sequeira u. a. [86] nutzen die gewichtete Summe aus Entfernungswert, Varianz, lokaler Orientierung des Objektes, Abstand zum Nachbarpunkt und Reflektivität der Oberfläche als Konfidenzwert der Messung.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, erhöhte Robustheit schon auf Sensorebene zu erreichen. Betrachtet man den einzelnen Messwert, so wird deutlich, dass zusätzlich zum

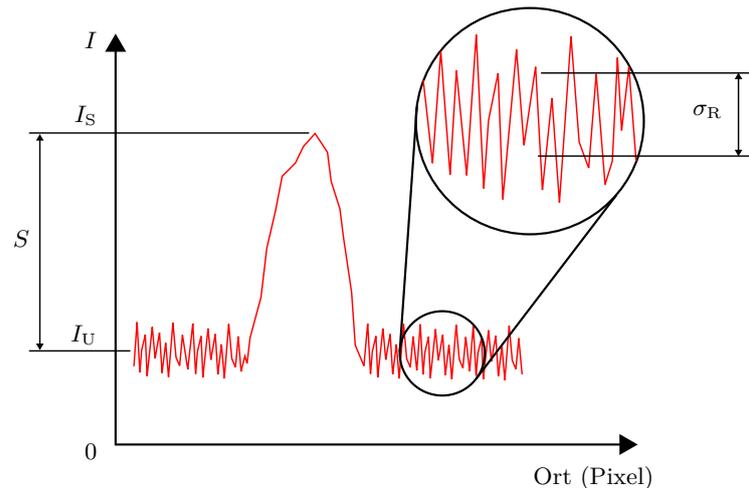


Abbildung 2.4: Messsignal eines optischen Sensors

Entfernungswert eine Qualitätsbewertung der Messung zur Klassifizierung des Punktes notwendig ist. Möglichst viele Messwerte sollen dabei als *gültig* (richtig positiv) oder *frei* (richtig negativ) bewertet werden können, um Fehler (falsch positiv, falsch negativ) bereits in der Hardware zu minimieren.

Als Qualitätsmaß zur Klassifizierung eines (optischen) Messwertes nach Tabelle 2.3 soll der Rauschabstand a_R dienen. Man vergleiche dazu Abbildung 2.4: Betrachtet man ein optisches Messsignal der Intensität I pro Pixel, so ist I_S die maximale Intensität der Messung und I_U die Intensität des Umgebungslichtes. Das Signal rauscht gleichmäßig an jedem Ort. Das Rauschen ist mit der Standardabweichung des Rauschens σ_R quantifiziert. Subtrahiert man $I_S - I_U$, so erhält man auswertbare Signalstärke der Messung S . Der Rauschabstand a_R ist nun wie folgt definiert:

$$a_R = 20 \cdot \log \left(\frac{S}{\sigma_R} \right) \text{ [dB]} . \quad (2.1)$$

Dabei wird die allgemein übliche logarithmische Größe Dezibel verwendet. Der Faktor 20 entsteht aufgrund der Tatsache, dass das Verhältnis aus Pegeln (S, σ_R) statt aus Leistungsgrößen gebildet wird.

Für die robuste Klassifizierung ist die Genauigkeit der Messung unerheblich, sie soll nicht bewertet werden. Zwar ist ein großer Rauschabstand Bedingung für eine genaue Messung, kann diese jedoch umgekehrt nicht garantieren: Es existiert eine Vielzahl weiterer Einflüsse auf die Messqualität, wie z. B. lokale Unterschiede in Reflektivität und Form, Laser Speckle oder die Unschärfe der Abbildung (vgl. Kapitel 6.3, [68]). Zur Quantifizierung der reinen messtechnischen Konfidenz im Sinne dieser Arbeit ist der Rauschabstand jedoch geeignet. Man betrachte dazu Abbildung 2.5. Liegt der Rauschabstand a_R des empfangenen Messsignals über einem Minimalwert $a_{R,\min}$, so wird davon ausgegangen,

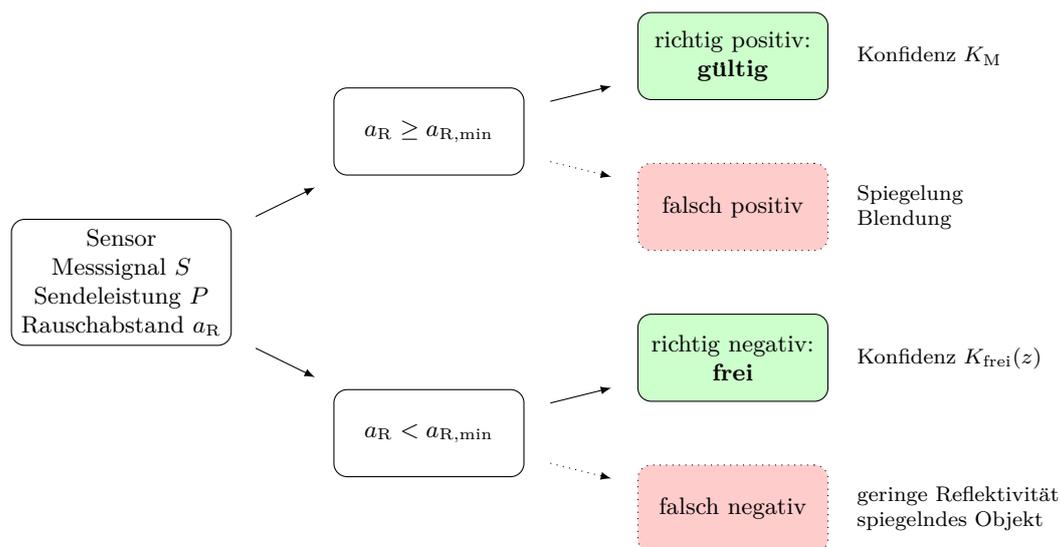


Abbildung 2.5: Robuste Klassifizierung der Messwerte

dass eine Messung erfolgreich stattgefunden hat. Der Schwellwert $a_{R,\min}$ dient der Unterscheidung zwischen Messung (positiv) und Nichtmessung (negativ). Das Messsignal wird so vom Rauschen abgegrenzt.

Die Konfidenz K_M einer Messung ist wie folgt definiert. Sie kann maximal 1 erreichen, wenn der Rauschabstand maximal wird:

$$K_M = \begin{cases} a_R/a_{R,\max} & \text{für } a_R \geq a_{R,\min} \\ 0 & \text{für } a_R < a_{R,\min} \end{cases} . \quad (2.2)$$

Je höher K_M wird, desto eher ist anzunehmen, dass die Messung *gültig* ist. Voraussetzung ist allerdings, dass im Strahlengang zwischen Sensor und Objekt keine Spiegelungen stattfinden, oder der Sensor durch Umgebungslicht stark übersteuert. In diesem Fall würde ein falsch positives Ergebnis erzeugt.

Unter Annahme von Gleichung (2.2) kann die Konfidenz nur durch höheren Rauschabstand der Messung vergrößert werden. Das Messsignal S muss also selektiv und unabhängig vom Rauschen σ_R erhöht werden, indem der Sensor aktiv Messlicht aussendet, welches direkt zur Abstandsmessung verwendet wird. In dieser Arbeit ist ein „aktiver (optischer) Sensor“ ähnlich wie in [13] dadurch definiert, dass er Messlicht mit der Leistung P aussendet, welches vom zu messenden Objekt reflektiert und vom Sensor, unabhängig vom Umgebungslicht, als Messsignal S empfangen und ausgewertet wird. Konsequenterweise verfügt ein passiver (optischer) Sensor über keine direkt zur Messung beitragende Beleuchtung (z. B. gewöhnliche Kameras). Mittels eines aktiven Sensors kann daher die Sendeleistung stets auf maximales a_R und damit maximale Konfidenz K_M geregelt werden.

Schwieriger ist es bei Freiraummessungen. In der Arbeit von Suppa [92] wird gefordert, dass ein Sensor einen Qualitätswert ausgeben muss, um freie Räume identifizieren zu können. Diese Forderung wird im Folgenden erläutert: Es gibt zwei Möglichkeiten der Freiraummessung: Der Raum zwischen Sensor und einem richtig positiven Messwert kann als frei angesehen werden. Doch was geschieht, wenn kein Messsignal empfangen wird? In [68] wird dieser Fall als Gegenstand zukünftiger Forschung angesehen: Welche Schlussfolgerungen können aus der Abwesenheit eines Messsignals gezogen werden? Falls keine Messung möglich ist, weil das Messsignal unter dem Schwellwert $a_{R,\min}$ liegt, muss unterschieden werden: Entweder reicht die Sensorreichweite nicht aus, um das nächste Objekt zu erkennen, oder es befindet sich gar kein Objekt in Messrichtung (z. B. bei Blick in den freien Himmel), oder das Objekt ist für den Sensor „unsichtbar“. In jedem Fall ist der Sensor „blind“ und es kann zunächst keine Aussage getroffen werden. Überträgt man dieses Problem in die Natur, so beobachtet man: Im Nebel oder absoluter Dunkelheit tasteten sich Menschen und Tiere vorwärts. Während Hindernisse eine Kraftreaktion am tastenden Körper hervorrufen, wird aufgrund des Fehlens einer solchen Kraftreaktionen der ertastete Raum als frei klassifiziert.

Visuelles, berührungsloses Tasten erscheint paradox, jedoch ist für einen aktiven Sensor eine (annähernd) analoge Vorgehensweise möglich: Das ausgesendete Signal wird schrittweise verstärkt, bis entweder eine Messung möglich ist, oder maximale Sendeleistung P_{\max} erreicht ist. Steigt die Sendeleistung und bleibt gleichzeitig der Rauschabstand des empfangenen Signals unter Minimum, wird es zunehmend unwahrscheinlich, ein falsch negatives Ergebnis zu erhalten. Die Konfidenz der Freiraummessung $K_{\text{frei}}(z)$ kann also in Abhängigkeit der Messentfernung z wie folgt angegeben werden:

$$K_{\text{frei}}(z) = P/P_{\max} \cdot C_{\text{dist}}(z) \quad | \quad a_R < a_{R,\min} . \quad (2.3)$$

Sie dient im Sinne von Suppa [92] als der geforderte Qualitätswert. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Stärke des empfangenen Messsignals S unter normalen Bedingungen i. A. entfernungsabhängig ist. So muss beispielsweise bei einem Triangulationssensor die Sendeleistung P proportional zum Quadrat der Entfernung z erhöht werden, um am Sensor ein konstantes Messsignal S zu empfangen. Dies wird durch den Faktor $C_{\text{dist}}(z)$ ausgedrückt, der je nach Bauart des Sensors individuell bestimmt werden muss. Es können auch noch andere Faktoren einfließen, wie z. B. die Fokussierung.

Freilich ist bei optischen Sensoren die Auswertung von K_{frei} fehleranfällig, da sich ein Objekt in ungünstigen Fällen vor der Erfassung verbergen kann, z. B. wenn die Oberfläche stark spiegelnd oder stark lichtabsorbierend ist. Dies kann zu einem falsch negativen Ergebnis führen.

Es wird also folgende Hypothese aufgestellt:

Robustheit-Hypothese: *Ein robuster optischer Hand-Auge Sensor für einen Roboterarm muss aktiv sein, seine Sendeleistung modulieren, und die Konfidenz der Messungen bewerten.*

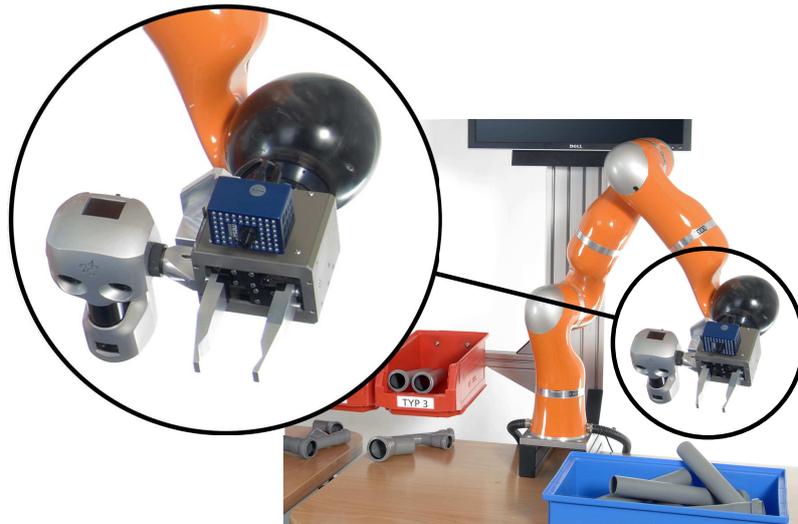


Abbildung 2.6: Multisensorsystem: DLR Co-Worker. Bild entnommen aus [47]

2.3.2 Vielseitigkeit

„Vielseitig“ bedeutet, verschiedene Fähigkeiten besitzend, viele Gebiete betreffend, umfassend⁶. Ein Roboter ist per Definition ein vielseitiges Werkzeug [100], was auch zentrales Thema der Arbeit von Hagn [48] ist: Darin wird die zielgerichtete Entwicklung eines Medizinroboters beschrieben, der in einem definierten Anwendungsfeld (Chirurgie) maximal vielseitig ist. Es wird zwischen spezialisierten, modularen und vielseitigen Systemen unterschieden, die eine möglichst breite Palette an Anwendungen abdecken. Diese Unterscheidung lässt sich auf alle Bereiche der Technik anwenden, also auch auf die 3D-Wahrnehmung: Wie im vorherigen Abschnitt erläutert, muss die Sensorik viele verschiedenartige Perzeptionsaufgaben meistern, weil sie, als wesentlicher Bestandteil des Roboters, dessen eigene Vielseitigkeit möglichst wenig einschränken, sondern im Gegenteil erweitern soll.

Ein modulares System kann die Wahrnehmung vielseitiger machen: Durch Kombination mehrerer Sensoren mit speziellen Eigenschaften zu einem umfassenden Multisensorsystem [94] lassen sich breite Anwendungsfelder erschließen [47, 74, 92]. Abbildung 2.6 zeigt mit dem DLR Co-Worker [47] einen Anwendungsfall: Es wird deutlich, dass die Sensoren, welche parallel zum Greifer montiert sind, den Roboter durch ihren Platzbedarf einschränken: Zum Einen ist die Beweglichkeit geringer, und zum Anderen wird das Eindringen des Greifers in Kavitäten („Griff in die Kiste“) erschwert. Daher ist dieses Vorgehen, auch wegen hoher Komplexität und Kosten, nur begrenzt sinnvoll.

Die Alternative ist die Verwendung weniger, oder eines einzigen, inhärent vielseitigen Sensors. Im Anwendungsfall der autonomen Modellierung und Exploration mit einem

⁶aus Duden online: <http://www.duden.de/node/645598/visions/1226604/view> (besucht am 14.04.2015)

Tabelle 2.4: Anforderungssatz Vielseitigkeit 1: Anwendungen Modellierung und Exploration

Anforderung	Modellierung	Exploration
Reichweite	o	++
Messtiefe	-	+
Genauigkeit	++	o
Robustheit	+	++
Datenrate	o	++

bewertet von sehr unwichtig bis sehr wichtig: -- | - | o | + | ++

Hand-Auge Sensor steht die begrenzte Nutzlast und das Platzangebot am TCP des (Leichtbau-) Roboters im Vordergrund. Um häufige Werkzeugwechsel zu vermeiden, ist es sinnvoll, dass der Sensor zusätzlich zum Werkzeug am TCP befestigt ist. Er soll den Roboter in seiner Bewegung und Geschicklichkeit jedoch möglichst nicht behindern. Es wird also gefordert, die Perzeption auf einen kleinen und leichten Sensor zu beschränken, der für dieses Szenario maximal vielseitig ist. Dies soll durch gezielte Sensorentwicklung sichergestellt werden. Das Anwendungsszenario wird dabei sinnvoll abgegrenzt, um ein optimales Verhältnis der Diversität der Anwendungen zu Nutzlast und Größe zu erreichen.

Zum Szenario gehören die sichere Exploration des Arbeitsraumes und die genaue Modellierung oft sehr unterschiedlicher Oberflächen. Diese beiden zentralen Anwendungen stellen jedoch divergierende Anforderungen an einige wichtige Sensoreigenschaften (vgl. Tabelle 2.4). Bei der Modellierung ist Genauigkeit wichtig, während bei der Exploration andere Eigenschaften hervorzuheben sind: Der Bewegungsraum eines Roboters umfasst meist ein großes Volumen. Daher sind eine große Reichweite und Messtiefe, sowie eine hohe Datenrate für die schnelle Exploration nützlich. Wie zuvor dargelegt, steht auch die Robustheit im Vordergrund.

Sinnvolle, eng mit diesem Szenario verknüpfte Anwendungen, wie handgeführte und mobile Modellierung wurden in Abschnitt 2.2.5 vorgestellt. Erweitert man die Entwicklung um diese Szenarien, sind weitere Aspekte zu berücksichtigen. Mit verhältnismäßig geringem Aufwand können so die Einsatzmöglichkeiten des Sensors noch gesteigert werden [80]: Ziel ist es, den Sensor derart zu gestalten, dass er sowohl autonom, als auch handgeführt betrieben werden kann. Gleichzeitig soll er am Roboter parallel zu einem Greifer oder einzeln verwendbar sein. Abbildung 2.7 illustriert diese Konfigurationen.

Tabelle 2.5 fasst die Anforderungen an diesen erweiterten Konfigurationssatz zusammen: Um menschliche Bedienung zu ermöglichen, muss das Design wenigstens greifbar und mit Tasten und Statusleuchten ausgerüstet sein. Ebenfalls von Bedeutung ist die Gestaltung des Flansches für die Befestigung am Roboter. So ist dieser im Alleinbetrieb am Roboter sinnvollerweise oben (ausgehend von der Orientierung der Skizzen in

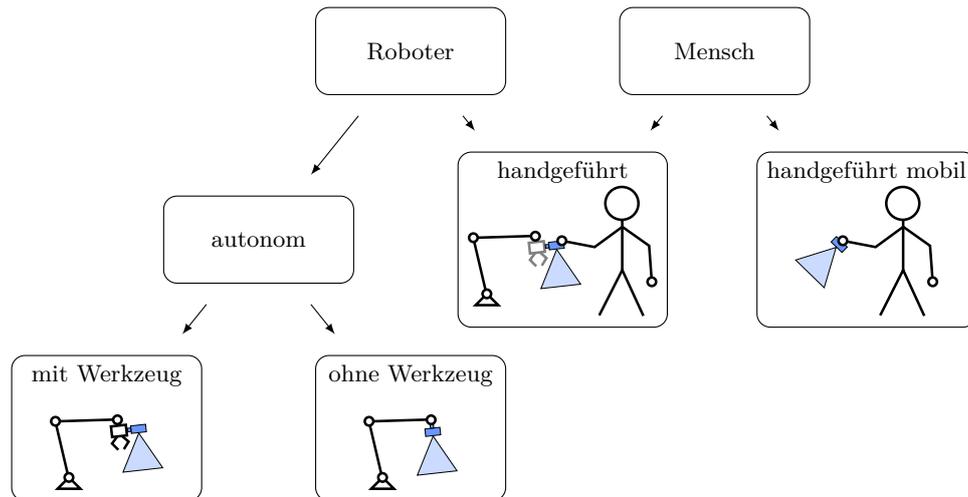


Abbildung 2.7: Vielseitige Sensorkonfigurationen: Roboter- und handgeführt

Tabelle 2.5: Anforderungssatz Vielseitigkeit 2: Sensorkonfigurationen

Anforderung	Roboter	Roboter + Werkzeug	Roboter handgeführt	handgeführt mobil
Gewicht	gering	gering	gering	gering
Größe	gering	gering	gering	gering
Flansch	oben	seitlich	seitlich	–
Griff	–	–	ja	ja
Tasten	–	–	ja	ja
Statusanzeige	–	–	ja	ja

Abbildung 2.7), um in Sensorblickrichtung einen möglichst schlanken Querschnitt zu erreichen, was vorteilhaft für die Pfadplanung und Kollisionsvermeidung ist. Ist parallel am TCP ein Werkzeug im Einsatz, muss der Sensor an die Seite weichen, um dem Werkzeug freien Zugang zum Objekt zu gewähren. Der Flansch sollte hier also seitlich liegen. Im mobilen handgeführten Betrieb ist kein Flansch notwendig, es sei denn zur Befestigung von Peripherie wie z. B. Markern für ein Trackingsystem. Sofern die genannten Erweiterungen im robotergeführten Betrieb als Haupteinsatzzweck keine Nachteile bringen, also weder Bauraum noch Gewicht maßgeblich erhöhen, kann dadurch die Vielseitigkeit des Sensors signifikant erhöht werden.

Zusammenfassend wird folgende Hypothese aufgestellt:

Vielseitigkeit-Hypothese: *Ein vielseitiger optischer Hand-Auge Sensor für einen Roboterarm muss die Anforderungen in Tabelle 2.4 und in Tabelle 2.5 erfüllen.*

2.4 Schlussfolgerungen

Aus der Vielzahl unterschiedlicher Roboterarten und Applikationen wurde ein sinnvoll abgegrenztes Szenario definiert: Autonome 3D-Modellierung und Exploration mittels eines Roboterarms und eines Hand-Auge Sensors. Dadurch wurde es möglich, die Anforderungen an die optische Wahrnehmung auf zwei zentrale Hypothesen zu verdichten. Diese Hypothesen für die *Vielseitigkeit* und *Robustheit* eines Hand-Auge Sensors sollen als Konstruktionsparadigmen die Grundlage für die zielgerichtete Entwicklung eines neuartigen Sensors sein: Der *VR-SCAN*.

3 Aktive optische Entfernungsmessung

Aus der Robustheit-Hypothese (vgl. Abschnitt 2.3.1) folgt unmittelbar, dass der *VR-SCAN* ein aktiver optischer Sensor sein muss. In diesem Kapitel soll ein Überblick über die Techniken aktiver optischer Entfernungsmessung gegeben werden. Es werden verschiedene Messprinzipien angewandt: Laut einem Review von Blais über 20 Jahre Entwicklung von Entfernungsmessern von 2004 [16] sind die wichtigsten Interferometrie, Laufzeitmessung (LIDAR) und Triangulation. Tabelle 3.1 zeigt einen Größenordnungsvergleich der genannten Verfahren hinsichtlich Messtiefe und Genauigkeit. Im betrachteten Szenario der Modellierung und Exploration mit einem Leichtbauroboter scheiden interferometrische Sensoren aufgrund zu geringer Reichweite aus. Relevant für die Perception in der Robotik sind demnach insbesondere Triangulation und Laufzeitmessung.

In Abschnitt 3.1 werden das Triangulationsprinzip eingehend beschrieben und die relevanten Formeln hergeleitet. Abschnitt 3.2 erläutert das Messprinzip der Lichtlaufzeit. Auf verschiedene Möglichkeiten der Lichtablenkung, wie sie in Scannern verwendet wird, wird am Ende des Kapitels in Abschnitt 3.3 eingegangen.

3.1 Triangulation

Triangulation ist eine der ältesten Formen der Abstandmessung, die ursprünglich bei der Landvermessung eingesetzt wurde. Grundsätzlich wird dabei ein Dreieck zwischen Beobachter und Vermessungspunkt aufgespannt. Ist die Länge der Basislinie bekannt, kann durch Messung zweier Winkel der Abstand mit trigonometrischen Formeln berechnet werden. In der aktiven Triangulation wird der Messpunkt beleuchtet (z. B. durch einen kollimierten Laser). Damit wird das Verfahren unabhängig vom Umgebungslicht und somit wesentlich robuster.

Tabelle 3.1: Optische Entfernungsmesser: Klassifizierung nach Messtiefe und Genauigkeit

Messprinzip	Messtiefe [m]	Genauigkeit [m]
Lichtlaufzeit	$10^1 - 10^3$	$10^{-2} - 10^{-3}$
Triangulation	10^0	10^{-4}
Interferometrie	10^{-2}	10^{-6}

3 Aktive optische Entfernungsmessung

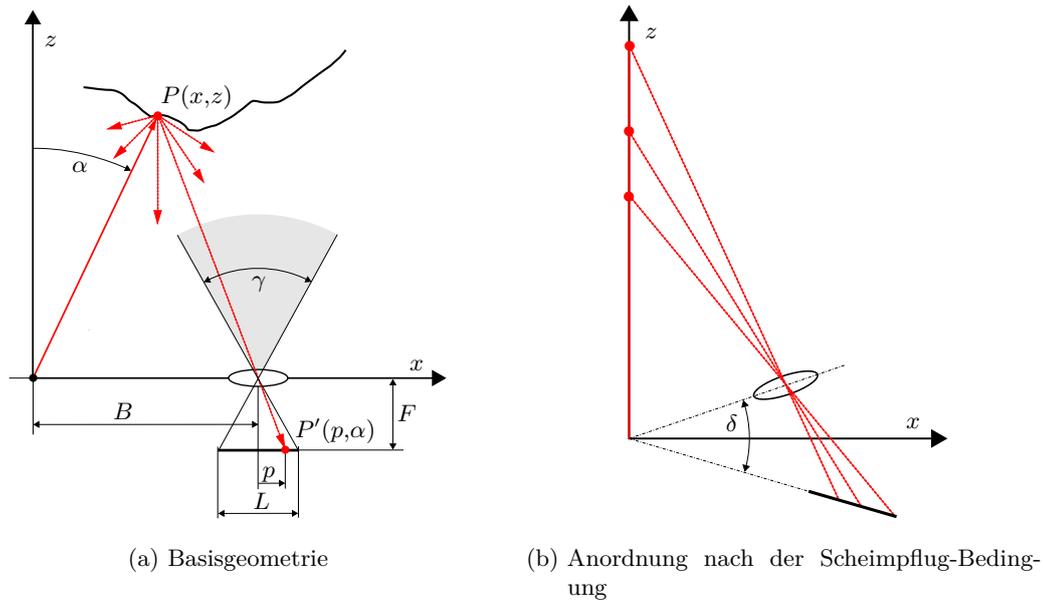


Abbildung 3.1: Prinzip der Lasertriangulation

Im folgenden Abschnitt wird die allgemeine Lasertriangulation beschrieben und berechnet. In den darauf folgenden Abschnitten werden die Möglichkeiten der Umsetzung, wie Einzelpunktscanner (Abschnitt 3.1.2) und die höherdimensionalen Anwendungen Lichtschnitt (Abschnitt 3.1.3) und Musterprojektion (Abschnitt 3.1.4) dargestellt. Auf Methoden der passiven Triangulation wird in Abschnitt 3.1.5 kurz eingegangen.

3.1.1 Allgemeine Lasertriangulation

Abbildung 3.1a zeigt das allgemeine Funktionsprinzip der Lasertriangulation: Im Ursprung des Koordinatensystems (x,z) wird unter dem Ablenkwinkel α ein kollimierter Laserstrahl ausgesendet, der ein Objekt im Punkt $P(x,z)$ trifft. Der dort projizierte Laserpunkt wird diffus in alle Richtungen reflektiert und somit auch durch die Linse in $(B,0)$ fokussiert und auf den Sensor mit der Länge L in Punkt $P'(p,\alpha)$ abgebildet.

Die Koordinate p steht für die Bildposition auf dem Detektor in $(B, -F)$. Die Brennweite f' der Linse ist nicht notwendigerweise gleich dem Abstand zur Sensorfläche F , dies wäre nach der Linsengleichung (A.1) lediglich der Fall bei Auslegung auf $z \rightarrow \infty$. Im Allgemeinen ist f' geringfügig kleiner als F bei der Auslegung auf einen endlichen Messbereich.

Die Berechnung des Punktes $P(x,z)$ in Abbildung 3.1a erfolgt nach folgenden Gleichungen (vgl. auch [16, 19]):

$$x = z \tan(\alpha) \quad (3.1)$$

$$\frac{F}{p} = \frac{z + F}{B - x + p} \quad (3.2)$$

Gleichung (3.1) eingesetzt in Gleichung (3.2) und aufgelöst nach z ergibt

$$z = \frac{B F}{p + F \tan(\alpha)}. \quad (3.3)$$

Die oben beschriebenen Zusammenhänge gelten unter idealen Bedingungen. In der Realität existieren jedoch immer Messfehler, in diesem Fall bei der Erfassung der Messgrößen p und α . Infolgedessen ist die gemessene (errechnete) Position von P stets verschieden von der unbekanntem, wahren Position. Mit x, z sind in Folge die (fehlerbehaftet) gemessenen Koordinaten von P gemeint.

Der Einfluss des Messfehlers in p auf z lässt sich mit (3.3) bei kleinen Δp wie folgt beschreiben:

$$\frac{\Delta p}{\Delta z} = \left| \frac{\partial p}{\partial z} \right| = \frac{B F}{z^2} \approx \frac{B f'}{z^2} \quad (3.4)$$

Die Messgenauigkeit ist also proportional zum Basisabstand B und dem Abstand Linse-Sensor F (\sim Brennweite f'), sowie umgekehrt proportional zum Quadrat der Entfernung z^2 . Sie ist unabhängig vom Winkel α .

Ist der Winkel α durch eine Scanbewegung variabel, so lässt sich der Einfluss des Winkelmessfehlers $\Delta \alpha$ auf z ebenfalls durch Ableitung nach z berechnen. Gleichung (3.3) aufgelöst nach α ist

$$\alpha = \arctan\left(\frac{B F - p z}{F z}\right) \quad (3.5)$$

und schließlich

$$\frac{\Delta \alpha}{\Delta z} = \left| \frac{\partial \alpha}{\partial z} \right| = \left| \frac{B F^2}{B^2 F^2 - 2 B F p z + F^2 z^2 + p^2 z^2} \right|.$$

Der Winkelfehler kann auch in Abhängigkeit von α angegeben werden, indem p mit Gleichung (3.3) eliminiert wird:

$$\frac{\Delta \alpha}{\Delta z} = \frac{B \cos^2(\alpha)}{z^2} \quad (3.6)$$

Die Genauigkeit steigt auch hier mit B und sinkt mit z^2 . Je größer die Ablenkung, desto stärker wird der Einfluss des Scanwinkels α , ausgedrückt durch $\cos^2(\alpha)$.

3 Aktive optische Entfernungsmessung

Der Gesamtfehler in z -Richtung beträgt also

$$\Delta z = \frac{z^2}{FB} \Delta p + \frac{z^2}{B \cos^2(\alpha)} \Delta \alpha . \quad (3.7)$$

Der Fehler in x -Richtung wird auf gleiche Weise hergeleitet. Für den Gesamtfehler Δx gilt folglich:

$$\Delta x = \frac{z}{\cos(\alpha)^2} \Delta \alpha + \tan(\alpha) \Delta z \quad (3.8)$$

Zu den Fehlereinflüssen siehe auch Kapitel 6.3.

Die wesentlichen Eigenschaften der Triangulation ist demnach die hohe Genauigkeit im Nahbereich. In der Ferne nimmt sie stark ab. Lange Brennweite und großer Basisabstand erhöhen die Genauigkeit, was allerdings mit Nachteilen verbunden ist: Durch ein großes F (lange Brennweite) wird bei gleicher Sensorgröße der Empfangswinkel γ schmaler:

$$\gamma = 2 \arctan \left(\frac{L}{2F} \right) \approx 2 \arctan \left(\frac{L}{2f'} \right) \quad (3.9)$$

Abschattungseffekte nehmen mit wachsendem Basisabstand zu, da die Blickrichtungen von Messlicht und Kamera auf das Objekt stärker variieren. Lange Brennweiten schränken bei gleicher Messentfernung zudem den nutzbaren Messbereich in z -Richtung durch sinkende Schärfentiefe ein (vgl. Anhang A.2).

Die Schärfe der Abbildung ist von erheblicher Bedeutung: Ein gut fokussierter Bildpunkt gewährleistet eine hohe Leistungsdichte, wodurch eine gute Signalstärke auf dem Detektor auch bei augensicheren Lasern (siehe Abschnitt 5.1.6) oder bei schlecht reflektierenden Oberflächen erreicht wird. Insbesondere die Messgenauigkeit leidet unter zunehmender Unschärfe stark (siehe auch Abschnitt 6.3).

Eine Maßnahme zur Erhöhung der Schärfentiefe ist, neben einer kürzeren Brennweite, die Verkleinerung der Apertur mit dem Nachteil der geringeren Lichtausbeute, sowie bei Triangulatoren, die aus der Fotografie bekannte Scheimpflug-Anordnung¹ von Linse, Detektor und Bildebene. Durch Neigung des Detektors relativ zur Linse um den Winkel δ wird der scharf abgebildete Bereich in die Tiefe gedreht. Dabei schneiden sich Bildebene, Objektebene und Linsenebene in einer Geraden durch den Ursprung, wie in Abbildung 3.1b dargestellt. Unter dieser Geometrie wird die Achse des Messlichts an jeder Tiefe z scharf auf den Detektor abgebildet. Insbesondere bei Systemen mit festem oder in engen Grenzen variiertem Winkel α ist dies sinnvoll. Bei größerem Empfangswinkel γ , wenn also ein nennenswert zweidimensionales Feld scharf auf die eindimensionale Sensorlinie abgebildet werden soll, ist auch die Scheimpflug-Anordnung nicht hilfreich. Durch die Verbreiterung des Sichtfeldes in x -Richtung wird wieder die konventionelle Geometrie mit paralleler Bild- und Objektebene attraktiv.

¹benannt nach dem österreichischen Offizier Theodor Scheimpflug (1865-1911)

Sei X die gewünschte Messbreite in x -Richtung. In Abhängigkeit der Entfernung z und des Empfangswinkels γ gilt

$$X = 2z \tan\left(\frac{\gamma}{2}\right). \quad (3.10)$$

Weiter gilt mit (3.4) und (3.9) für die klassische Lasertriangulation der Zusammenhang

$$\begin{aligned} \Delta z &= \frac{2z^2}{B} \tan\left(\frac{\gamma}{2}\right) \left[\frac{\Delta p}{L}\right] \\ \Delta z &= \frac{zX}{B} \left[\frac{\Delta p}{L}\right], \end{aligned} \quad (3.11)$$

mit $\left(\frac{\Delta p}{L}\right)$ als die erzielbare Auflösung² pro Länge des Sensorelementes (= Kehrwert der Anzahl der aufgelösten Elemente). Es muss also stets ein Kompromiss zwischen hoher Präzision und großem Blickwinkel (große Messbreite X) geschlossen werden. Die Parameter müssen genau auf den Anwendungsfall abgestimmt sein, um einen ausgewogenen Triangulationssensor zu erhalten.

Es gibt viele verschiedene Umsetzungen des Triangulationsprinzips: Im einfachsten Fall ist der Winkel α des ausgesendeten Strahls konstant, was die Abstandsmessung auf eine Dimension entlang des Messlichts beschränkt. Wie in den folgenden Abschnitten erläutert, sind Messungen in weiteren Dimensionen auf unterschiedliche Weise möglich.

3.1.2 Einzelpunkt-Triangulationsscanner

Mit verschiedenen Techniken kann der Mess- und/oder Empfangsstrahl in einer oder mehreren Richtungen abgelenkt werden. Mit Kenntnis der Ablenkungswinkel (z. B. α in Abbildung 3.1a) erfolgt die Abstandsberechnung nach der o. a. Methode. Es wird zu einem Zeitpunkt immer nur ein einzelner Punkt vermessen, siehe Abbildung 3.2a. Daher sind Einzelpunkt-Triangulatoren sehr robust gegen Umgebungslicht und Störlichtquellen, da die Messlichtleistung und/oder die Kamerabelichtung für jeden Messpunkt optimal eingestellt werden kann. Der Messaufnehmer der Zeilenkamera ist heutzutage diskret pixelbasiert (CCD, CMOS, Photodioden-Array), früher wurden auch kontinuierliche analoge PSD (Position Sensitive Device) verwendet. In letzterem Fall ist Störlicht ein prinzipielles Problem, da die Bildposition nur über den Schwerpunkt der gesamten Bestrahlung ermittelt werden kann. Näheres zu den üblichen Scannertechniken wird in Abschnitt 3.3 erläutert.

3.1.3 Lichtschnitt

Ein Lichtschnittsensor entsteht dadurch, dass das Prinzip aus Abbildung 3.1a in y -Richtung ausgeweitet wird, indem statt eines Punktes eine Linie projiziert wird (siehe

²Nach DIN 1319-1 [31] ist die „Auflösung“ die kleinste Differenz zweier unterscheidbarer Messwerte

3 Aktive optische Entfernungsmessung

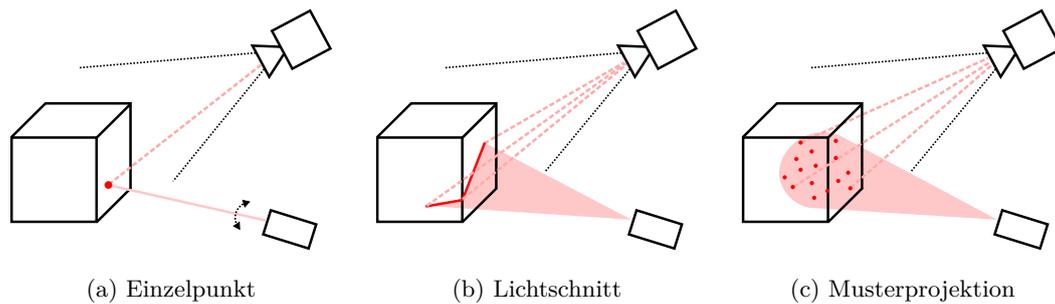


Abbildung 3.2: Methoden der Lasertriangulation

Abbildung 3.2b). Als Detektor muss folglich ein Matrixsensor verwendet werden. Mit jedem ausgewerteten Bild werden mehrere 3D-Punkte nach dem oben erläuterten Grundprinzip trianguliert. Dieser Ansatz benötigt keine mechanisch bewegten Teile und ist daher kostengünstig und robust.

Analog zu Gleichung (3.11) steht auch bei der Linienprojektion hohe Präzision einem großem Blickfeld im Wege. Ein weiterer Nachteil ist mangelnde Robustheit gegen Umgebungslicht, da die Kamera die gesamte Szene abbilden muss. Die Linie ist im ganzen Bild gleichförmig beleuchtet, ohne dass lokale Unterschiede in der Reflektivität berücksichtigt werden. Der Rauschabstand der einzelnen lokalen Messpunkte unterscheidet sich teils erheblich je nach Beschaffenheit der Oberfläche, da die Belichtung sich nur an einem Durchschnittswert orientieren kann. Konfidenzwerte zur Freiraummessung sind also nur eingeschränkt möglich, da eine Klassifizierung nach Abbildung 2.5 nur über die globale Belichtung und nicht punktweise möglich ist.

3.1.4 Musterprojektion

Die Messdichte kann durch die Projektion eines Musters erhöht werden (vgl. Abbildung 3.2c). Beim Prinzip der Streifenlichtprojektion werden mehrere Linien projiziert. Prinzipiell verhält sich das Verfahren analog zum Lichtschnittverfahren mit den gleichen Nachteilen. Es existieren weitere Techniken der Musterprojektion, die letztendlich alle nach dem Triangulationsprinzip funktionieren, nachdem die Korrespondenzen zwischen Muster und Bild gefunden wurden. Beispiele sind zufällige Punktmuster, binär kodierte sequentielle Streifenprojektionen oder Moiré-Projektoren. Auch hier kann ein Scanner das Blickfeld oder die Messdichte weiter erhöhen. Jedoch muss berücksichtigt werden, dass die Bildrate einer Matrixkamera wesentlich geringer als die einer Zeilenkamera ist, und folglich auch die Scanbewegung langsamer sein muss.

Hauptvorteil der Musterprojektion ist die Messung eines zweidimensionalen Sichtfeldes, welches pro Messvorgang ein 2D-Bild mit Tiefeninformation (2,5D³) liefert. Die zu einem Bild gehörigen Punkte werden also zeitgleich aufgenommen, im Unterschied zu den Einzelpunkt- oder Lichtschnittsensoren, welche ein 2,5D Bild durch eine Abfolge mehrerer Messungen aufbauen müssen. Ist die Szene statisch und die Pose des Sensors jederzeit bekannt, sind die Verfahren äquivalent. Umgekehrt können Musterprojektoren ausnutzen, dass das 2,5D-Bild innerhalb einer Belichtung als Ganzes aufgenommen wird: Es kann auf eine Posenmessung des Sensors verzichtet werden, da einzelne, sich überlappende Tiefenbilder sukzessive zu einem Gesamt-3D-Bild zusammengesetzt werden können. Die Tiefenbilder werden durch geeignete Optimierungsalgorithmen in ihren Überlappungsbereichen zueinander registriert. Der dadurch entstehende, sich fortpflanzende Fehler ist aufgrund der im Allgemeinen sehr hohen Messgenauigkeiten und Messdichten gering, im Falle eines Ringschlusses (geschlossenes 3D-Objekt) durch globale Registrierung noch geringer.

3.1.5 Passive Triangulation

Der Vollständigkeit halber sei hier noch erwähnt, dass Triangulation auch ohne strukturierte Beleuchtung weit verbreitet ist, z. B. in der Geodäsie mittels Theodoliten. Das räumliche menschliche Sehen funktioniert nach demselben Prinzip, welches auch in der Technik mit Stereovision und Stereokameras häufig ist. Um Entfernungen berechnen zu können, sind passive Stereoverfahren jedoch auf ausreichende Textur der Bilder angewiesen, um zwischen den Einzelaufnahmen Disparitäten berechnen zu können. Ein gänzlich einfarbiges und unstrukturiertes Objekt erzeugt keine auswertbaren Marken im Bild, so dass auch mit einer divergenten Beleuchtung (Scheinwerfer) keine Entfernungsmessung möglich ist. Aus diesem Grund widersprechen passive Stereokameras der Robustheit-Hypothese aus 2.3.1 und werden in dieser Arbeit nicht weiter verfolgt.

3.2 Lichtlaufzeit und Phasenmessung

Bei der Lichtlaufzeitmessung (LIDAR) wird die Zeit Δt gemessen, die ein Lichtimpuls benötigt, um die Strecke zum Objekt und als reflektiertes Licht wieder zurück zum Empfänger zurückzulegen. Die Entfernung l berechnet sich mit der konstanten Lichtgeschwindigkeit c durch $l = c \cdot \Delta t / 2$. Dieses Verfahren deckt eine sehr große Messtiefe ab und ist schnell. Die Reichweite ist theoretisch unbegrenzt und nur von der Lichtleistung und Reinheit der Atmosphäre abhängig. Durch die sehr kurzen Zeitdifferenzen, die ausgewertet werden müssen, ist die Genauigkeit allerdings mäßig. Sie liegt üblicherweise im Bereich von mehreren Millimetern [12, 16], ist jedoch nahezu unabhängig von der Entfernung [12].

³Diese Art der Datenaufnahme wird 2,5D genannt, um den Unterschied zu echter 3D-Information (Volumendaten) zu verdeutlichen, die oft aus unterschiedlichen Perspektiven erfasst werden muss.

3 Aktive optische Entfernungsmessung

Alternativ kann die Phasenverschiebung amplitudenmodulierter Laserstrahlung genutzt werden: Die Phasendifferenz ϕ zwischen ausgesendetem und empfangenem Licht wird ausgewertet, und daraus indirekt ebenfalls über die Lichtlaufzeit die Entfernung bestimmt. Mit der Modulationsfrequenz f gilt: $l = c \cdot \phi / (4\pi f)$. Bei diesem Verfahren ist die Messung außerhalb des spezifizierten Entfernungsbereichs jedoch aufgrund des periodischen Signals uneindeutig.

Das prinzipiell eindimensionale Verfahren lässt sich auch auf eine Matrixkamera ausweiten. „Time-of-flight“ (ToF) Kameras oder „Photonic mixing devices“ nutzen einen 2D-Bildsensor, der nach dem Prinzip der Phasenverschiebung auf Pixelebene 2,5D Tiefenbilder in Videogeschwindigkeit generiert. Die Auflösung und Genauigkeit solcher Sensoren ist jedoch noch gering. Da alle Verfahren auf der Lichtlaufzeit basieren, ist im weiteren Verlauf der Arbeit allgemein von Lichtlaufzeit- oder ToF-Sensoren die Rede.

3.3 Techniken der Lichtablenkung (Scanner)

Mittels Ablenkung des Messlichts durch einen Spiegel (Scanner) kann die Messdimension erweitert werden. Bei einem Lichtlaufzeitsensor gestaltet sich die Ablenkung einfacher als bei Triangulationssensoren, da die Sende- und Empfangsstrahlen den gleichen Weg zurücklegen. Es muss lediglich eine Mindestapertur der Spiegel sichergestellt sein, um genügend reflektiertes Licht für die Auswertung zu sammeln. Verbreitet sind Spiegel mit Galvanometerantrieb [12, 20, 78], kontinuierlich drehende Spiegel oder Polygonspiegel [77, 108]. Vielversprechend ist auch der Ansatz, MEMS⁴-Mikrospiegel mit großer Apertur zu verwenden [81, 95]. Bei zweiachsiger Ablenkung wird oft ein kontinuierlicher Antrieb mit einem periodischen kombiniert [62], auch indem der gesamte Sensorkörper mit eindimensionaler Ablenkung rotiert wird [42].

Bei Triangulationsscannern müssen aufgrund des Basisabstandes die unterschiedlichen Strahlengänge von Sende- und Empfangsstrahlen berücksichtigt werden. Aus einem 1D Abstandsensor wird mit veränderlichem α ein Profilschanner. In Abbildung 3.3a ist dieses Verfahren dargestellt: Es wird ein zweidimensionales Messfeld abgedeckt, welches sich aus dem Schnittbereich von Scanbereich und Kamerablickfeld ergibt. Vorteilhaft ist der kompakte und einfache Aufbau, wenngleich die fundamentale Einschränkung der Lasertriangulation nicht abgemildert ist: Der notwendige Kompromiss zwischen Sichtbereich, Schärfentiefe und Präzision.

In Abbildung 3.3b wird der gesamte Sensor rotiert oder verschoben. Das Grundprinzip der Messung bleibt eindimensional, während der Sensor bewegt wird. Vorteile sind der einfache Aufbau und ein Sichtbereich von bis zu 360°. Durch die Scheimpflug-Anordnung kann die Schärfentiefe und damit die Messtiefe deutlich erhöht werden. Die schwierige Daten- und Energieübertragung sowie eine hohe bewegte Masse sind die Nachteile.

⁴Mikro-Elektromechanisches System

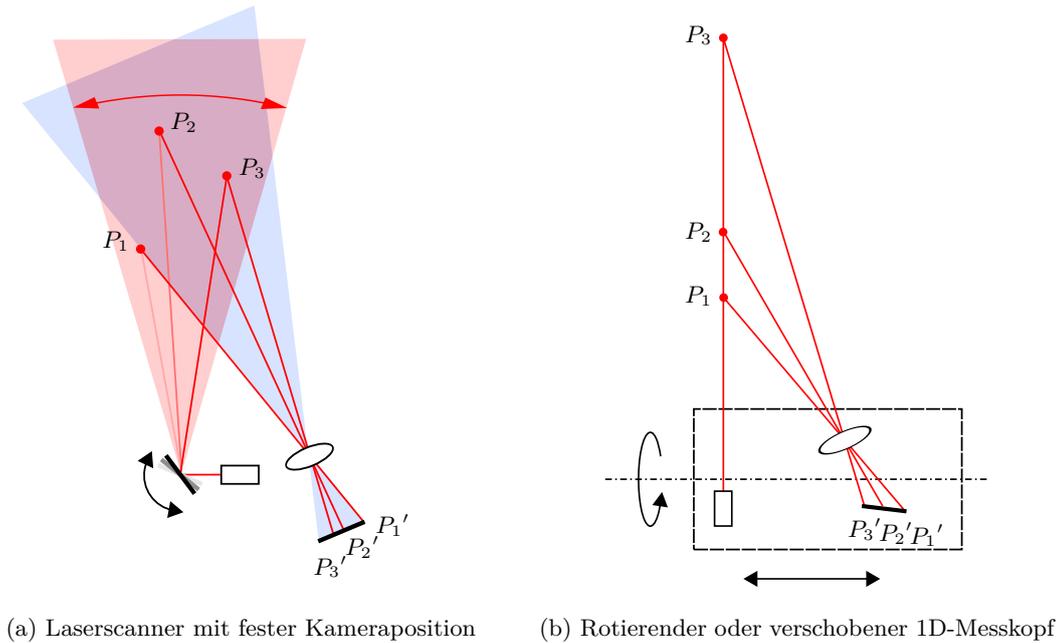


Abbildung 3.3: Einfache Laserscanner

Der DLR-Laserscanner [46] funktioniert nach diesem Prinzip, wenn auch dort auf die Scheimpflug-Geometrie verzichtet wurde.

Werden sowohl Sende- und Empfangsstrahlen synchron abgelenkt, ergeben sich mehrere Vorteile: Der Öffnungswinkel des Sensors ist unabhängig vom Öffnungswinkel der Optik vor der Ablenkung. Das Sichtfeld des Sensors wird durch synchronisiertes Scannen vergrößert. Dadurch kann die Brennweite verlängert werden, was die Präzision steigert. In Abbildung 3.4 werden zwei Konzepte für synchronisierte Scanner vorgestellt. Im lateral synchronisierten Scanner (Bild 3.4a) werden alle Strahlen durch einen hinreichend großen Spiegel gemeinsam abgelenkt. Die Spiegelachse liegt in der xz -Ebene. Ähnlich des Konzeptes aus Bild 3.3b bleibt die Triangulation eindimensional, wodurch mittels der Scheimpflug-Anordnung große Schärfentiefe und Messtiefe bei hoher Präzision erreicht wird [14, 108].

Bild 3.4b zeigt das longitudinal synchronisierte Konzept von Rioux [77]: In dieser Messgeometrie werden von einem beidseitig beschichteten bewegten Spiegel und zwei festen Spiegeln die Sende- und Empfangsstrahlen synchron abgelenkt, so dass der vergleichsweise schmale Blickwinkel der Kamera mit der Scanbewegung mitwandert. Auch hier kann eine lange Brennweite verwendet werden, was gleichzeitig nach Gleichung (3.4) einen geringeren Basisabstand bei gleicher Präzision ermöglicht. Dadurch werden Abschattungseffekte verringert. Durch Kombination mit einem zusätzlichen Spiegel nach dem lateralen Konzept wird dem Messbereich eine weitere Dimension hinzugefügt, und es können (sequentielle) 2,5D-Bilder aufgenommen werden [12].

3 Aktive optische Entfernungsmessung

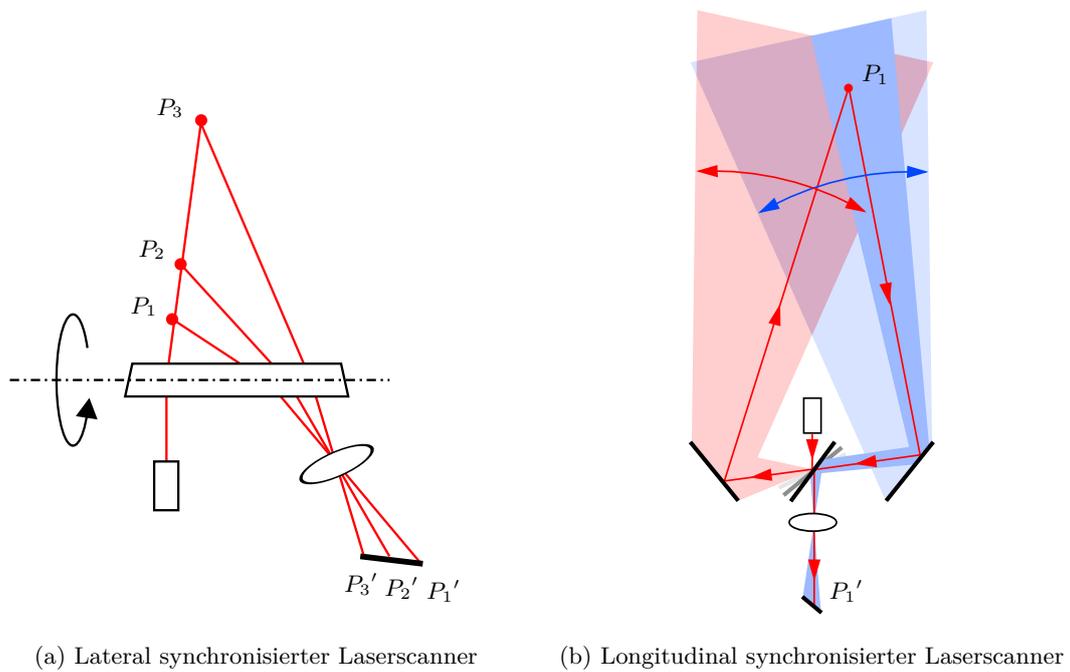


Abbildung 3.4: Synchronisierte Laserscanner

4 Stand der Technik

Der Fokus der folgenden Zusammenstellung des Standes der Technik liegt auf aktiven optischen Entfernungsmesssystemen. Passive Sensoren und andere Methoden werden nur kurz angesprochen. Das Wort „Sensor“ wird oft synonym für „Sensorsystem“ verwendet.¹

Zunächst wird auf die gängigen Techniken zur optischen Entfernungsmessung mit ihren Stärken und Schwächen eingegangen. Anschließend werden ausgewählte Systeme aus Industrie und Forschung vorgestellt, welche schließlich, unter Berücksichtigung der Robustheit- und Vielseitigkeitshypothesen aus Abschnitt 2.3, bewertet werden.

4.1 Systeme in Industrie und Forschung

Die unübersehbar große Vielfalt wissenschaftlicher oder kommerzieller Entfernungsmesssysteme deckt heute fast alle Anforderungen nach Reichweite, Genauigkeit, Datenrate und Messprinzip ab. Blais [16] gab 2004 in einem technischen Review einen guten Überblick über 20 Jahre Entwicklung optischer Entfernungsmesser. Er berücksichtigte dabei sowohl alle relevanten Messprinzipien als auch eine Vielzahl von Implementierungen. Tilo Wüsthoff hat 2009 eine Produktanalyse mit Fokus auf die Handhabung durchgeführt [106], die die Vielfalt bestätigt.

Gemäß der Robustheit-Hypothese in Abschnitt 2.3.1 werden in diesem Abschnitt aktive optische Sensoren vorgestellt. Passive Techniken wie Stereovision oder nicht-optische Verfahren wie Ultraschall werden nicht berücksichtigt. In den folgenden Abschnitten wird nach den verbreiteten Triangulationsmethoden Lichtschnitt, Musterprojektion und Einzelpunkt-Triangulation sowie nach Lichtlaufzeitsensoren unterteilt.

4.1.1 Einzelpunktscanner

Ein Einzelpunktscanner setzt das Verfahren aus Abbildung 3.1a in Verbindung mit einem Scanner (vgl. Abschnitt 3.3) um. In Tabelle 4.1 werden relevante Systeme aufgeführt (Bilder dieser und folgender Systeme siehe Anhang B.1):

¹korrekter wäre laut DIN 1319-1 [31] die Bezeichnung „Messeinrichtung“

Tabelle 4.1: Einzelpunktscanner

	T-SCAN 3	Zhang2014 [108]	DLR LRS	NRC LRS
Hersteller	Steinbichler	Tianjin Uni- versity	DLR	NRC Canada
Messbereich	ca. 45 – 120	65 – 135	50 – 300	100 – 1000
Messtiefe	75	70	250	900
Genauigkeit ^a	0,001 (Auflösung)	$\pm 0,025$ (calibration accuracy)	0,1 – 4,7 ($1 \sigma^b$)	0,1 – 7 (Auflösung)
Gewicht	1200		180	450
max. Größe	172		75	120
Bemerkung	hochgenauer, handgeführter Modellierer	Laboraufbau	Großer Scan- winkel 270° , sehr klein	Kompakter synchronisier- ter Scanner

Die Daten wurden von den Herstellern übernommen.

Einheiten: [mm, g]

^a Die vom Hersteller verwendete Bezeichnung/Größe ist in Klammern angegeben.

^b empirische Standardabweichung der Messwerte

- Der T-SCAN 3 von Steinbichler [88] ist ein hochgenauer Sensor für die handgeführte Modellierung. Er wird zusammen mit einer Trackingkamera hauptsächlich in der Qualitätskontrolle und Inspektion eingesetzt.
- Zhang stellte 2014 einen lateral synchronisierten Scanner (vgl. Abbildung 3.4a) vor, der gleichzeitig Sende- und Empfangsstrahl eines 1D-Triangulationssensor mit einem rotierenden Spiegel ablenkt [108]. Scanner und Triangulationssensor sind dabei unabhängige Teilsysteme.
- Der DLR Laser Range Scanner [46] entstand 1997 am DLR Institut für Robotik und Mechatronik. Ein miniaturisierter 1D-Entfernungsmesskopf wird als Ganzes rotiert (vgl. Abbildung 3.3b) und ermöglicht 270° Scanwinkel. Die Laserleistung wird für jeden Messpunkt für optimale Signalstärke am Detektor moduliert und zurückgegeben. Die Genauigkeit leidet unter dem sehr kompakten Aufbau und dem analogen Detektor (PSD), näheres dazu in [58]. Hauptanwendungen sind autonome Arbeitsraumexploration und handgeführte Modellierung.
- Das NRC (National Research Council) Canada stellte bereits 1987 einen longitudinal synchronisierten Laserscanner (vgl. Abbildung 3.4b) für Robotikanwendungen vor [78]. Er erreicht ein großes Blickfeld bei großer Messtiefe. Der Sensor ist sehr kompakt und damit als Hand-Auge Sensor geeignet. Es wird bereits ein digitaler Detektor (CCD) verwendet.

Tabelle 4.2: Lichtschnittsensoren

	ModelMaker MMDx100	ScanControl 2700-100	DLR LSP ^a	DAVID Starter Kit 2
Hersteller	Nikon	Micro-Epsilon	DLR	DAVID
Messbereich	100 – 200	300 – 600	150 – 500	10 – 400
Messtiefe	100	300	350	400
Genauigkeit	0,01 (1σ)	0,015 (Auflösung)	0,3 – 2,5 (QMW ^b)	0,05 – 2 (0,5% der Objektgröße)
Gewicht	400	850	850	
Größe	~150	170	~160	
Bemerkung	hochgenauer, handgeführter 3D Modellierer	industrieller Lichtschnitt- sensor	Teil des DLR 3D Modellers [94]	Low Cost, feste Kamera, hand- geführter Laser

Die Daten wurden von den Herstellern übernommen.

Einheiten: [mm, g]

^a Laser Stripe Profiler (Lichtschnittsensor)

^b Quadratischer Mittelwert

4.1.2 Lichtschnittsensoren

Das mit Abstand am weitesten verbreitete Prinzip in Industrie und Forschung ist das Lichtschnittverfahren. Dabei wird eine projizierte Laserlinie von einer Matrixkamera erfasst und die Entfernungswerte nach Segmentierung der Linie trianguliert, wie in Abschnitt 3.1 erläutert. Tabelle 4.2 listet ausgewählte Systeme auf:

- Der ModelMaker von Nikon [72] ist ein typischer handgeführter Sensor für hochgenaue Modellierung in der Qualitätssicherung und Reverse-Engineering. Er wird in Verbindung mit einem passiven Messarm (FARO, Romer, Nikon) zur Posenbestimmung verwendet.
- Der ScanControl von Micro-Epsilon [70] wird in der industriellen Automation eingesetzt. Er hat ein robustes Gehäuse und wird im Allgemeinen fest vor bewegten Objekten (Förderband) oder auch am Roboter montiert. Mögliche Anwendungen sind Inspektion und Qualitätssicherung.
- Ein Beispiel für einen wissenschaftlichen Lichtschnittsensor ist der am DLR Institut für Robotik und Mechatronik entwickelte Laser Stripe Profiler [90, 94] zur Erforschung von Kalibrier- und Modelliermethoden. Er ist in den DLR 3D-Modellierer [94] integriert und kommt ohne Bandpass- oder Farbfilterung in der Kamera aus. Die Genauigkeit ist dadurch vermindert, da das Umgebungslicht vor der Mes-

Tabelle 4.3: Musterprojektionssensoren

	ATOS Compact Scan 2M	GO!SCAN 20	FlyTri ^a Face	Artec Spider
Hersteller	GOM	Creaform	Uni Erlangen	Artec 3D
Messbereich	450 – 1200	380 – 480		170 – 300
Messtiefe	750	100	100	130
Genauigkeit	0,021 – 0,615 (Punktabstand)	0,3 (3D accuracy)	0,12 (Messunsicherheit)	0,05+ (3D Genauigkeit)
Gewicht	4000	930		850
Größe	340	235		190
Bemerkung	hochgenau, groß, schwer	Handgeführt, kein externes Tracking nötig. Unabhängig von Objekt- und Sensorbewegung. Texturierung der Modelle.		

Die Daten wurden von den Herstellern übernommen.

Einheiten: [mm, g]

^a „Flying Triangulation“

sung nicht ausgefiltert wird. Er wird in der autonomen und handgeführten 3D-Modellierung verwendet.

- Ein einfacher und kostengünstiger Sensor für Privatanwender ist der DAVID [29, 104]. Er benötigt zur Erstellung eines 3D-Modells lediglich einen handgeführten Linienlaser, eine fest installierte Kamera auf einem Stativ und eine Ecke im Scanbereich zur Lageschätzung des Lasers. Da DAVID lediglich ein Prinzip, und die Hardware des Sensors nicht spezifiziert ist, hängt die Genauigkeit stark von den verwendeten Komponenten und der Kamerakalibrierung ab.

4.1.3 Musterprojektion

Sensoren mit einer Matrixkamera und einem Musterprojektor liefern mit jeder Messung ein 2,5 D Tiefenbild. Eine Scanbewegung ist daher meist unnötig. Durch Registrierung einzelner, überlappender Tiefenbilder aus unterschiedlichen Perspektiven zueinander kann ein vollständiges 3D Modell erzeugt werden. Tabelle 4.3 listet vier Musterprojektionssensoren auf:

- Der ATOS Compact Scan 2M [43] ist ein Sensor für die industrielle Qualitätssicherung. Er kann große Flächen sehr schnell und hochgenau digitalisieren, ist jedoch verhältnismäßig groß und schwer. Er wird z. B. durch Industrieroboter bewegt.

- Der GO!Scan 20 von Creaform [27] ist ein mobiler handgeführter Modellierer, welcher ohne externes Tracking (Posenmessung) auskommt. Einsatzgebiete sind schwer zugängliche Bereiche, Denkmalschutz, Forensik und Industrieanwendungen.
- Der „Flying Triangulation Face“ Sensor der Universität Erlangen [36] projiziert relativ grobe Linienmuster, um die Berechnung der 3D-Tiefendaten in Echtzeit bereitzustellen. Dies ermöglicht effektive online-3D-Registrierung der Einzelbilder zueinander. Auf diese Weise ist der Sensor unabhängig von Bewegung sowohl des Objektes als auch des Sensors selbst. Durch Bewegung wird das zunächst grobe Tiefenbild stetig dichter. Der Sensor benötigt, wie die vorherigen Sensoren, kein externes Tracking und kann die 3D-Flächen texturieren. Das Prinzip ist beliebig skalierbar.
- Der Artec Spider [7] ist sehr genauer handgeführter Sensor, der wie die beiden vorherigen ohne externes Tracking auskommt. Laut eigenen Angaben wurde er speziell für CAD-Nutzer entwickelt. Hauptanwendungsgebiete sind Reverse Engineering, Produktdesign, Qualitätskontrolle und Massenfertigung.

4.1.4 Lichtlaufzeit

Lichtlaufzeitsensoren sind robust und kostengünstig. Sie haben prinzipbedingt oft eine sehr große Reichweite und Messtiefe. ToF Matrixkameras liefern Tiefenbilder in Videogeschwindigkeit. In Tabelle 4.4 ist eine Auswahl von Einzelpunkt-ToF Sensoren und ToF-Kameras aufgeführt:

- Der Sokuiki Sensor von Hokuyo [55, 57] ist einer der kleinsten Scanner auf dem Markt. Durch rotierende Spiegel wird ein großer Scanwinkel zur Verfügung gestellt, wodurch sich der Einsatz als Navigationssensor auf mobilen, auch fliegenden Plattformen anbietet. Die Genauigkeit leidet unter der kostengünstigen und kompakten Bauweise.
- Im Jahr 2014 stellte Kimoto [62] eine Weiterentwicklung des Sokuiki Sensors vor. Er ist mit einer weiteren Scanachse ausgerüstet und die Genauigkeit wurde etwas verbessert. Bemerkenswert ist auch hier das große Blickfeld von $270^\circ \times 40^\circ$ und die geringen Abmessungen (vgl. Abbildung B.2).
- Eine weit verbreitete ToF-Kamera ist die SR4000 von MESA Imaging [69, 73]. Da sie in Videogeschwindigkeit 2,5D Tiefenbilder liefert, ist sie in der mobilen Robotik sehr beliebt. Nachteile sind die geringe Auflösung von 176×144 Pixel und die mäßige Genauigkeit.
- Das Camboard nano von pmd Technologies [26, 76] ist eine extrem kleines Referenzdesign einer ToF-Kamera. Die Sensoreigenschaften wie Reichweite und Genauigkeit stehen hinter der Baugröße zurück.

Tabelle 4.4: Lichtlaufzeit (ToF) Sensoren

	Sokuiki URG-04LX	Kimoto2014 [62]	SR4000 USB	Camboard Nano
Hersteller	Hokuyo	Hokuyo	MESA Imaging	pmd
Messbereich	20 – 4000	0 – 30 m	0,8 – 5 m	0 – 700
Messtiefe	3980	30 m	4,2 m	700
Genauigkeit	$\pm 10 - 40$	7,2 – 16,6 (1σ)	± 10 (Absolute Accuracy)	25 (RMSE)
Gewicht	160	700	470	<100
Größe	70	135	68	37
Bemerkung	großer Scanwinkel (270°), sehr kompakt	Scanner mit 2 Achsen	weit verbreitete ToF-Kamera	sehr kleines Referenzdesign mit großem FoV ($90^\circ \times 86^\circ$)

Die Daten wurden von den Herstellern übernommen.

Einheiten: [mm, g]

4.1.5 Andere Messsysteme

Einige Sensoren mit besonderen Eigenschaften oder einer Kombination aus mehreren Messprinzipien werden in Tabelle 4.5 vorgestellt:

- Der Zebedee Sensor [1, 23] zeichnet sich durch seine Software zur Kartenerstellung aus. Er besteht aus einem ToF-Scanner (Hokuyo UTM-30LX) und einer IMU, die auf einer Feder montiert sind. An der Feder ist am unteren Ende ein Griff befestigt, womit der Sensor handgeführt umhergetragen wird. Durch die passive Wippbewegung der Feder beim Gehen wird das 2D-Scanfeld ständig neu orientiert. Durch geeignete SLAM-Software lokalisiert sich der Sensor aus den Laserscanner- und IMU-Daten und erzeugt in Folge eine 3D-Punktwolke. Dieser Ansatz kommt mit einfacher und kostengünstiger Hardware aus.
- Aufgrund des sehr niedrigen Preises, sehr guter Verfügbarkeit und der Fähigkeit, hochauflösende 2,5D Tiefenbilder in Echtzeit zu liefern, ist die Xtion Pro Live von ASUS [8, 44] in der Robotik sehr beliebt. Der Sensor ist nahezu identisch mit der etwas größeren Microsoft Kinect, welcher als erster Sensor das Prinzip auf den Massenmarkt brachte. Das von PrimeSense entwickelte Messprinzip basiert auf einer Mischung aus Musterprojektion und einem aktiven Stereoverfahren. Ein Laser projiziert mittels einer diffraktiver Optik ein konstantes, pseudo-zufälliges Punktmuster auf die Szene, welches von einer Kamera aus einem anderen Blickwinkel

Tabelle 4.5: Andere optische Entfernungsmesser

	Zebedee ZEB-1	Xtion Pro Live	TACO	LARS
Hersteller	3D Laser Mapping	Asus	TACO Project	NRC Canada
Messbereich	0 – 30 m	0,8 – 3,5 m		0,5 – 2000 m
Messtiefe	30 m	2,7 m		2000 m
Genauigkeit	30 (3D Accuracy)	8 (σ at 2 m)	schlechter als Kinect [101]	0,51 / 0,75 (σ z at 1,5 / 2,25 m)
Gewicht	700	~300	< 1 – 4 kg	2,75 kg
Größe	360	180		
Messprinzip	ToF/IMU	active stereo	ToF	SPT ^a /ToF
Bemerkung	auf Feder montiert für SLAM	gleiches Prinzip wie MS Kinect	Fovealer Sensor	Sensor für Raumfahrt

Die Daten wurden von den Herstellern übernommen.

Einheiten: [mm, g]

^a Single Point Triangulation (Einzelpunkttriangulation)

beobachtet wird. Nach Berechnung der Korrespondenzen der Punkte wird deren Abstand trianguliert.

- Das menschliche Prinzip des „fovealen Sehens“ wird im TACO Projekt [95] umgesetzt: Der Sensor kann seine Auflösung und sein Sichtfeld auf bestimmte Details von Interesse richten, indem das Bewegungsmuster der zweidimensionalen MEMS Spiegel neu konfiguriert wird. Die Entfernungsmessung erfolgt nach dem ToF Prinzip. Die Vorteile dieses Ansatzes hängen stark von der vorherigen groben Analyse der Szene ab. Laut Abschlussbericht des Projektes muss hier noch viel Arbeit geleistet werden, ebenso ist die Genauigkeit des Sensors noch nicht zufriedenstellend, da er nicht mit herkömmlichen Sensoren wie Kinect mithalten kann [101].
- Im Jahr 2000 wurde vom NRC Canada ein 3D-Sensor für Raumfahrtanwendungen vorgestellt [12]. Der Laserscanner kombiniert einen in zwei Achsen synchronisierten Triangulationsscanner nach Abbildung 3.4 für präzise Messungen im Nahbereich (0,5-10m) mit einem ToF-Scanner für den Fernbereich bis 2000m. Letzterer nutzt den gleichen Strahlengang wie der Triangulator. Dieser Sensor maximiert dadurch seine Vielseitigkeit für das Anwendungsgebiet Raumfahrt.

4.2 Schlussfolgerungen

Überprüft man die als repräsentativ betrachteten angeführten Systeme auf die in Kapitel 2.3 aufgestellten Hypothesen zu Robustheit und Vielseitigkeit, so stellt man fest, dass

4 *Stand der Technik*

ein Sensor, der gleichermaßen beide Hypothesen erfüllt, nicht existiert: Die ToF-Sensoren scheiden aufgrund ihrer für präzise Modellierung zu geringen Genauigkeit aus. Viele Systeme sind zu groß und zu schwer, um an einem Leichtbauroboter am TCP neben einem Werkzeug montiert zu werden. Viele der übrigen Sensoren verfügen über eine zu geringe Messtiefe (speziell die Musterprojektions- und Lichtschnittsensoren) und sind damit für die Exploration schlecht geeignet. Interessant ist das synchronisierte Scannerkonzept des NRC Canada: Der Sensor von Rioux [78] scheint sehr vielversprechend, wenn er auch heute nicht (mehr) verfügbar ist. Jedoch kann weder bei diesem System noch bei den meisten anderen eine Aussage über möglicherweise stattfindende Konfidenzbewertung der Messungen getroffen werden.

Es soll also ein aktiver Sensor entwickelt werden, welcher hinsichtlich seiner Präzision und Messtiefe die Lücke zwischen hochgenauen Triangulationssystemen und ToF-Sensoren schließt. Er soll zudem klein und leicht sein, und so als vielseitiger und robuster Sensor auf das Szenario „autonome 3D-Modellierung und Exploration mittels eines Leichtbauroboters und eines Sensors in Hand-Auge Konfiguration“ ausgelegt sein: Der *VR-SCAN*.

5 Entwicklung des *VR-SCAN*

Do you really want to do this?¹

(Philip C. D. Hobbs)

Ausgehend von den in Kapitel 2 aufgestellten Hypothesen zur Vielseitigkeit und Robustheit sowie dem Stand der Technik (Kapitel 4) wird in diesem Kapitel die Auslegung und Konstruktion eines neuen Laserscanners beschrieben: Der *VR-SCAN* soll durch zielgerichtete Konstruktion als ein vielseitiger und robuster Explorations- und Modellierungssensor die aufgezeigten Lücken schließen. Ein Zwischenstand der Arbeiten wurde in [60] präsentiert.

Die folgenden Abschnitte sind aus Gründen der Lesbarkeit thematisch und kausal geordnet. In Wirklichkeit geschah die Entwicklung jedoch iterativ. So wurden viele Komponenten zunächst simuliert und in Prüfständen einzeln und im Kontext zueinander evaluiert, bevor die Liste der Komponenten feststand und die endgültige Konstruktion begann. Soweit passend, werden diese Schritte in diesem Kapitel beschrieben, ansonsten sei auf Kapitel 6 verwiesen.

In Abschnitt 5.1 werden aus den Hypothesen aus Kapitel 2 die Konstruktionsziele abgeleitet und die technische Machbarkeit diskutiert. Am Ende dieses Abschnittes wird die Anforderungsliste an den Scanner präsentiert (Abschnitt 5.1.8). Die Auslegung und das Konzept des *VR-SCAN* beschreibt Abschnitt 5.2, indem detailliert auf die einzelnen Komponenten eingegangen wird. Abschließend wird in Abschnitt 5.3 der Prototyp des *VR-SCAN* mit seinen Einzelkomponenten und kurzer Beschreibung der elektronischen Konstruktion und der FPGA²-Implementierung präsentiert.

5.1 Konstruktionsziele

Ausgehend von den Anwenderforderungen (s. Tabelle 2.1) wurden in Kapitel 2 die zentralen Hypothesen zu Vielseitigkeit und Robustheit (Abschnitt 2.3) aufgestellt. Demnach soll ein aktiver Sensor mit modulierbarer Sendeleistung entwickelt werden, der Konfidenzwerte zurückgibt und darüber hinaus die Anforderungen aus den Tabellen 2.4 und 2.5 technisch realisiert. Im Folgenden werden diese Hypothesen und die daraus bereits gewonnenen Erkenntnisse zu Konstruktionszielen konkretisiert, um daraus schließlich Anforderungen abzuleiten.

¹Am Anfang des Kapitels *Designing Electro-Optical Systems* in [53]

²Field Programmable Gate Array (Programmierbarer Logikbaustein)

5.1.1 Messbereich

Der Messbereich eines optischen Entfernungssensors ist definiert als der Entfernungsbereich innerhalb des Empfangswinkels, in dem Messungen mit spezifizierter Genauigkeit vorgenommen werden können. Dabei ist die Messtiefe die Differenz zwischen maximaler und minimaler Messentfernung. Je nach mittlerer Messentfernung unterscheidet man zwischen Sensoren für den Nahbereich, solchen für mittlere Entfernungen und Fernbereichssensoren.

Ein ideal vielseitiger Sensor hat eine große Messtiefe und die Messentfernung ist auf die Anwendung angepasst oder gar variabel. In der Realität limitieren jedoch meist drei Faktoren die Messtiefe:

- Zunächst ist bei aktiven Verfahren die Messentfernung durch die Stärke der Beleuchtung begrenzt, denn die Bestrahlungsstärke E nimmt quadratisch mit der radialen Entfernung r ab:

$$E \sim 1/r^2 \quad (5.1)$$

- Bei Triangulationssensoren nimmt die Präzision des Entfernungsmesswertes z mit dem Quadrat der Entfernung ab (vgl. Kapitel 3.1, Gleichung (3.4)):

$$\Delta z^{-1} \sim 1/z^2 \quad (5.2)$$

- Schließlich begrenzt die zur Lichtausbeute benötigte Apertur der Empfangsoptik die Schärfentiefe und somit die Messtiefe, wenn nicht nachfokussiert wird (vgl. Anhang A.2).

Lediglich lichtlaufzeitbasierte Sensoren (LIDAR) haben einen großen Messbereich, in dem die Präzision kaum von der Entfernung abhängt [4]. Der Preis dafür ist geringere Genauigkeit.

Der *VR-SCAN* soll als robotergeführter Sensor im Anwendungsfall „Exploration“ mit seinem Messbereich in der Größenordnung des Arbeitsraumes eines Leichtbauroboters (LBR) liegen (vgl. Abschnitt 2.2.4). Der Messbereich wird daher grob auf 1 m festgelegt. Die Messtiefe soll in diesem Bereich möglichst groß sein. Gemäß den Anwenderwünschen soll der Sensor ab 250 mm Entfernung messen können. Das Messfeld soll wenigstens zwei-dimensional sein. Die Messbreite X (vgl. Gleichung (3.11)) orientiert sich an der Größe der zu digitalisierenden Objekte: Ziel ist, die Bewegungen des Roboters zu minimieren, die notwendig sind, um ein durchschnittlich großes Objekt zu erfassen, welches der LBR manipulieren kann. Daher ist der Sensor so auszulegen, dass in mittlerer Messentfernung das Blickfeld ausreichend groß ist. Bei 40° Blickwinkel kann ein Objekt der Größe 0,5 m in der Entfernung $z = 250 \text{ mm} / \tan(20^\circ) \approx 690 \text{ mm}$ erfasst werden. Ein größerer Blickwinkel (z. B. für Rundumsicht) ist durch die Beweglichkeit der Hand-Auge Konfiguration verzichtbar, was die Konstruktion des Scanners vereinfacht.

5.1.2 Konfidenzbewertung der Messwerte

Voraussetzung für eine Konfidenzbewertung der Messwerte nach Abschnitt 2.3.1 ist ein aktives Messverfahren. Nach Gleichung (2.2) ist die Konfidenz der Messung K_M maximal mit dem größtmöglichem Rauschabstand a_R am Detektor. Im Fall einer Freiraummessung wird K_{frei} nach Gleichung (2.3) zusammen mit der ausgesendeten Leistung des Messlichts P maximal. Also würde es genügen, wenn die Leistung des Messlichts stets maximal ist.

Ab einer gewissen Sendeleistung ist die Signalstärke S jedoch gesättigt, und gemäß Gleichung (2.1) a_R und damit K_M nicht weiter steigerbar. Durch die Sättigung würde sich allerdings das Messergebnis durch Informationsverlust verschlechtern: Der gesättigte Teil des Signals trägt keine Information, lediglich die (steileren) Flanken können ausgewertet werden.

Am Detektor ist daher auf hohe Signalstärke zu achten. Gleichzeitig soll die Sendeleistung P so gering wie möglich geregelt werden, so dass der Rauschabstand a_R gerade noch maximal ist.

Die zu messende Szene ist unbekannt, daher sind lokal große Unterschiede in Geometrie und/oder Reflektivität möglich. Dies kann zu hoher ortsbedingter Dynamik der Signalstärke S und folglich des Rauschabstandes führen. Um gute Messergebnisse bei gleichzeitig optimaler Konfidenz zu erhalten, muss demnach die Leistungsregelung des Messlichts mit dieser örtlichen Dynamik mithalten, was nur bei punktwissem Messverfahren möglich ist. Dies stellt einen wesentlichen Vorteil gegenüber zeilen- oder matrixweiser Messung dar.

Folglich soll der *VR-SCAN* gemäß der Robustheit-Hypothese ein aktiver Sensor mit schneller punktwisser Leistungsmodulation sein, wobei die Konfidenzen nach den Gleichungen (2.2) und (2.3) aus Abschnitt 2.3.1 berechnet werden.

5.1.3 Größe und Gewicht

Der Sensor soll durch kleine und leichte Bauweise die Vielseitigkeit des Roboters möglichst wenig einschränken. Insbesondere soll er dessen Beweglichkeit und Geschwindigkeit so wenig wie möglich vermindern sowie beim Greifen oder Manipulieren von Objekten nicht im Wege sein. Dies gilt insbesondere bei gleichzeitiger Montage von Sensor und Werkzeug, andernfalls muss ein Werkzeugwechsel zwischen Perzeption und Manipulation stattfinden, was wiederum Zeit kostet. Je kleiner und leichter der Roboterarm ist, desto anspruchsvoller wird dieses Ziel. Der kleinste Roboter, der hier berücksichtigt werden soll, ist der am Institut RM entwickelte DLR MIRO mit maximaler Nutzlast von 30 N [50]. Als Größenordnung wird als Ziel festgelegt, dass der Sensor maximal 20% der Nutzlast verbraucht, also maximal 600 g wiegt, was für Werkzeuge oder Instrumente noch 2,4 kg übrig lässt.

5 Entwicklung des VR-SCAN

Die maximale Größe des VR-SCAN orientiert sich an den Manipulatoren, die am Institut zusammen mit Leichtbaurobotern genutzt werden, wie dem Greifer „PG70“ von Schunk³ (Breite 112 mm) oder der DLR-Hand 2 [24]: Der VR-SCAN sollte bei paralleler Befestigung nicht über die Manipulatoren hinausragen, um die Beweglichkeit nicht noch weiter einzuschränken. Daher wird als maximale Abmessung 100 mm festgelegt.

5.1.4 Genauigkeit

Die Messabweichung einer Messung setzt sich nach DIN 1319-1 [31] aus der zufälligen und der systematischen Messabweichung zusammen. Durch Kalibrierung des Messgerätes wird angestrebt, die systematische Messabweichung zu ermitteln und durch Berechnung oder Tabellen zu korrigieren (siehe Kapitel 6). Die verbleibende Messabweichung besteht aus der durch Kalibrierung nicht erfassten systematischen Restabweichung und der zufälligen Messabweichung.

Die Wiederholgenauigkeit oder Präzision um den Erwartungswert gilt als Maß für die zufällige Messabweichung. Die nach der Kalibrierung verbleibende systematische Restabweichung wird als klein gegenüber der zufälligen Messabweichung betrachtet, welche nicht korrigierbar ist. Durch Auswertung mehrerer unabhängiger Messungen kann ein Vertrauensbereich für den wahren Wert angegeben werden. Es wird ein symmetrisches Intervall um den gemessenen Wert gebildet, innerhalb dessen der wahre Wert mit einer angegebenen Wahrscheinlichkeit erwartet wird. Die halbe Breite dieses Intervalls wird Messunsicherheit genannt.

Als Maß für die (zufällige) Messunsicherheit gilt die empirische Standardabweichung σ mehrerer, unter wiederholbaren Bedingungen erfasster, Messwerte. Die Wahrscheinlichkeit, dass der wahre Wert im Intervall $x_M \pm \sigma$ um einen einzelnen Messwert x_M liegt, beträgt dann 68,3%, sofern die Messwerte normalverteilt sind und die verbleibende systematische Unsicherheit vernachlässigt werden kann.

Ein „gutes“ Messinstrument hat eine hohe Präzision und geringe systematische Unsicherheit. Sofern nicht explizit von einem der beiden Begriffe die Rede ist, wird für beides der qualitative Begriff „Genauigkeit“ verwendet.

Auf dem Markt erhältliche Triangulationssensoren (i. A. Lichtschnitt-Lasersensoren) liefern oft sehr hohe Genauigkeit, bis unter 0,01 mm (siehe Kapitel 4.1). Es erfordert einen großen Aufwand und nicht unerhebliche Baugröße, um diese Genauigkeit zu erreichen. Je nach Anwendungsfall variieren die Anforderungen an die Genauigkeit jedoch stark, wie in Tabelle 2.4 ersichtlich. Dort wird zwischen Exploration und Modellierung unterschieden. Ein Modellierer soll hochgenau sein, während die Genauigkeit eines Explorationsensors nicht überragend sein muss, vielmehr müssen die Messungen robust sein. Es lohnt sich jedoch auch, den Zweck einer Modellierung zu hinterfragen: Ein Modell, welches zu Reproduktionszwecken, Reverse Engineering oder im Rahmen der Qualitätssicherung

³www.schunk.de/schunk_files/attachments/PG_70_DE.pdf

erfasst wird, muss genauer sein als ein Modell zur Greifplanung, Registrierung oder zur Grundlage für Objekterkennung. Die letztgenannten Anwendungsfälle sind in der Robotik maßgeblich.

Der Fokus des *VR-SCAN* liegt daher darauf, für die verschiedenen Anwendungen jeweils die „richtige“ Genauigkeit zu liefern: Im Nahbereich ist er als Modellierer möglichst genau. Gleichzeitig misst er als Explorationssensor in fernerer Bereichen mit akzeptabler Präzision und generell hoher Robustheit. Er soll also die Lücke zwischen hochgenauen Modellierern und weitreichenden, ungenaueren lichtlaufzeitbasierten Systemen schließen. Die Messunsicherheit (angegeben in 1σ) soll gemäß den Anwenderforderungen (Tabelle 2.1) rund 0,1 % der Messentfernung betragen, also ca. 0,25 mm im Nah- und 1 mm im Fernbereich.

5.1.5 Messtakt und Auflösung

Die Anwendung bestimmt den erforderlichen Messtakt des Sensors. Eine hoher Messtakt geht zulasten der Genauigkeit, ermöglicht aber schnelle Digitalisierung und damit Echtzeit-Anwendungen. In manchen Fällen, wie z. B. in der Exploration, kann der Messtakt einen höheren Stellenwert als die Genauigkeit haben: Der Bewegungsraum eines Roboters nimmt ein großes Volumen ein, welches im Extremfall komplett und damit zeitintensiv erfasst werden muss. Für die folgende Bewegungsplanung ist die Genauigkeit des Umgebungsmodells weniger relevant als die Robustheit der Messung und deren Messtakt. Daher wird ein hoher Messtakt angestrebt. In der Bedarfsanalyse (Tabelle 2.1) wurde mehr als 10 kHz Punktrate gefordert, was der Rate des damals aktuellen DLR LRS entspricht.

Die Modellierung eines Objektes soll ebenfalls hinreichend schnell sein. Der Sensor soll bereits mit einmaligem Überstreichen des Objektes eine ausreichende Punktedichte liefern. Hochauflösende Modellierung findet im Nahbereich statt (ca. 300 mm) und der Punktabstand soll mindestens 0,5 mm betragen. Die erforderliche Winkelauflösung errechnet sich damit zu 1,7 mrad. Bei 10 kHz Messtakt folgt für die maximale Bewegungsgeschwindigkeit der Messstelle relativ zum Objekt:

$$v_M = \frac{10000 \cdot 0,5^2}{2 \cdot 300 \cdot \tan(20^\circ)} = 11,4 \text{ mm/s} .$$

Dieser Wert ist relativ niedrig, weshalb der Messtakt letztendlich deutlich über 10 kHz liegen sollte.

5.1.6 Lichtquelle und Augensicherheit

Da der Sensor auch von Menschen bedienbar sein soll, sollte die Wellenlänge des Lasers im sichtbaren Bereich liegen. Dadurch wird das Zielen auf das Vermessungsobjekt erleichtert, da die Messstelle sichtbar ist.

5 Entwicklung des VR-SCAN

Der auf das zu vermessende Objekt projizierte Messpunkt P soll im gesamten Messbereich klein sein, um feine geometrische Strukturen auflösen zu können. Der Projektor muss also einen kollimierten⁴ Strahl mit geringer Divergenz aussenden. Die Form des Punktes ist dabei idealerweise stets kreisförmig, um die Ermittlung der Bildkoordinate p auf dem Detektor zu vereinfachen. Nach Abschnitt 5.1.4 soll die Messgenauigkeit 0,1 % der Messentfernung z betragen. Das seitliche Auflösungsvermögen soll in der gleichen Größenordnung liegen. Setzt man dieses gleich dem Durchmesser des projizierten Messpunktes s , so gilt im Messbereich

$$s(z) \leq 0,001z \quad | \quad z = [250..1000] . \quad (5.3)$$

Solch geringe Strahlradien über eine lange Strecke erfordern eine Lichtquelle mit sehr geringer Divergenz. Ein Laser hat die erforderlichen Eigenschaften, jedoch wird sich in Abschnitt 5.2.9 zeigen, dass selbst unter idealen Bedingungen Gleichung (5.3) nicht erfüllt werden kann. Es kann nur angestrebt werden, einen Laserprojektor mit möglichst geringer Divergenz und minimalem Strahldurchmesser zu bauen.

Bei Einsatz eines Lasers muss die Augensicherheit garantiert sein. Nach DIN 60825-1 [32] sind Laser der Klassen 1, 1M, 2 und 2M selbst bei kurzem direkten Blick in den Strahl als sicher anzusehen. Der VR-SCAN soll daher maximal einen Laser der Klasse 2M besitzen. Zur Laserklassifizierung des VR-SCAN siehe Anhang C.

5.1.7 Schnittstellen

Die erforderlichen Schnittstellen des VR-SCAN lassen sich wie folgt aufteilen:

- *Mechanik*: Die Anbringung des Sensors am Roboter soll in den in Bild 2.7 gezeigten Konfigurationen möglich sein. Demnach benötigt der VR-SCAN zwei rechtwinklig zueinander stehende Flansche.
- *Elektrik*: Da der Sensor am TCP des Roboters befestigt wird, müssen die Leitungen für Daten und Energie über die gesamte kinematische Kette zur Basis geführt werden. Aus diesem Grund sollen die benötigten Kabel minimiert werden und ausreichend flexibel sein. Es wird ein Kabel mit kombinierter Daten- und Energieübertragung angestrebt.
- *Benutzerschnittstelle*: Es soll darüber hinaus möglich sein, den Sensor per Hand zu bedienen. Nach Tabelle 2.5 soll er greifbar sein und benötigt Tasten und Statusanzeigen. Angelehnt an eine 3-Tasten PC-Maus wird die Zahl der Tasten auf drei festgelegt. Die Statusanzeige soll aufgrund beengter Platzverhältnisse minimal sein, es genügen also verschiedenfarbige Leuchtdioden.

⁴Parallele Ausrichtung der Lichtstrahlen.

Tabelle 5.1: Anforderungen an den *VR-SCAN*

Anforderung	Wert	Beschreibung
Messbereich	250 – 1000 mm	Abdeckung der Aufgaben Modellierung und Exploration
Messtiefe	möglich groß	
Winkelauflösung	1,7 mrad	Messpunktabstand 0,5 mm bei $z = 300$ mm
Empfangswinkel	40°	Messbreite 500 mm in ≈ 690 mm Entfernung
Messunsicherheit 1σ	0,1 mm	Nahbereich: Modellierung
	1 mm	Fernbereich: Exploration
Größe	< 100 mm	Hand-Auge Sensor am Leichtbauroboter
Gewicht	< 600 g	Hand-Auge Sensor am Leichtbauroboter
Messprinzip	aktiv	Robustheit gegen Umgebungslicht und Oberflächeneigenschaften
Sendeleistung	modulierbar	notwendig für Konfidenzbewertung und konstanten Rauschabstand
Messverfahren	punktweise	hohe örtliche Auflösung der Konfidenzwerte
Messtakt	$\gg 10$ kHz	deutlich höher als der DLR LRS
Tasten	> 2	zur Handbedienung
Anzeige		Statusleuchten
Design		für Menschen gut greif- und bedienbar
Flansche	> 1	für: Roboterbetrieb exklusiv oder neben Werkzeug, handgeführt, Zubehörmontage (z. B. Trackingmarker)
Anzahl Kabel	1	kombinierte Daten- und Stromversorgung
Projektor		Laser im sichtbaren Bereich, geringe Divergenz, minimaler Strahldurchmesser
Laserklasse	$\leq 2M$	augensicher

5.1.8 Zusammenfassung und Anforderungsliste

Aus der in Kapitel 2 präsentierten internen Bedarfsanalyse (s. Tabelle 2.1) und den daraus abgeleiteten Hypothesen zu Vielseitigkeit und Robustheit (Abschnitt 2.3) wurden in den vorherigen Abschnitten die Konstruktionsziele hinsichtlich der technischen Machbarkeit diskutiert und quantifiziert. In Tabelle 5.1 werden die Ergebnisse zu einer Anforderungsliste an den *VR-SCAN* zusammengefasst.

Im Vergleich zu den Forderungen aus Tabelle 2.1 (siehe Seite 6) ist der Punkt *Sterilisierbarkeit* sowie der Wunsch nach *2,5 D Messwerten* nicht mehr berücksichtigt. Dies ist die Folge der notwendigen Fokussierung der Entwicklung auf das in Kapitel 2 spezifizierte Szenario „Autonome 3D-Modellierung und Exploration mit einem Roboterarm“: Sterilisierbarkeit ist lediglich bei einigen medizinischen Anwendungen im OP notwendig, verlangt aber weitreichende Maßnahmen bei der Konstruktion hinsichtlich Dichtigkeit.

Daher wurde der zu erwartende Gewinn an Vielseitigkeit als gering im Verhältnis zum nötigen konstruktiven Aufwand eingestuft. Der Wunsch nach 2,5D Messwerten wurde ebenfalls fallen gelassen, da diese im betrachteten Szenario nicht vonnöten sind. Auch dieser Punkt würde erheblichen konstruktiven Mehraufwand bedeuten. In weiterer Konsequenz werden auch die genannten Applikationen *Scannen einer Mundhöhle* und *Tracking* nicht weiter verfolgt. Erstere stellt eine Spezialanwendung dar und steht daher einer vielseitigen Entwicklung im Wege, letztere erfordert im Allgemeinen 2,5D Messwerte.

5.2 Konzept und Auslegung des VR-SCAN

Die Konzeption und Auslegung des VR-SCAN wird in den folgenden Abschnitten detailliert beschrieben. Maßgeblich sind dabei die Anforderungen aus Tabelle 5.1. Die in den einzelnen Unterabschnitten beschriebenen Komponenten sind teils voneinander abhängig. Sie sind daher in entsprechender hierarchischer Reihenfolge aufgeführt. Das Konzept wird hier kurz zusammengefasst:

- Gemäß der Anforderungen an die Messunsicherheit (Tabelle 5.1) soll der VR-SCAN im Nahbereich auf 0,1 mm und in 1 m Entfernung auf 1 mm genau messen. Das Prinzip der *aktiven Triangulation* bietet sich an (siehe Abschnitt 5.2.1), ToF-Prinzipien sind für solch kurze Entfernungen und hohe Genauigkeiten ungeeignet. Ein *Einzelpunktscanner* erfüllt die Forderungen aus Abschnitt 5.1.2 zur Konfidenzbewertung.
- Der Spiegel kann sehr klein sein, da dessen Apertur lediglich den kollimierten Laserstrahl aufnehmen muss. Das empfangene Licht wird direkt von der festen Kamera erfasst. Synchronisierte Scanner nach Abbildung 3.4 benötigen im Gegensatz dazu wesentlich größere Spiegel. Als Ablenkeinheit des Lichts kommt daher ein *MEMS Mikrospiegel* in Frage (Abschnitt 5.2.2).
- Eine optische *Indexmarke* stellt die genaue Erfassung des Scanwinkels sicher (Abschnitt 5.2.3).
- Der stabile Betrieb des MEMS Mikrospiegels erfordert eine *Amplituden- und Phasenregelung* (Abschnitt 5.2.4).
- Ein *diskreter Detektor* ermöglicht Robustheit gegenüber Umgebungslicht und Fehlreflexionen. Es wird ein schneller Zeilensensor verwendet (Abschnitt 5.2.5).
- Die *Synchronisierung von Scanner und Detektor* wird in Abschnitt 5.2.6 beschrieben.
- Die *geometrischen Abmessungen des Gesamtsystems* werden in Abschnitt 5.2.7 ausgelegt.
- Abschnitt 5.2.8 beschreibt die Auslegung der *Empfangsoptik* bestehend aus Linsensystem und Filter.

- Ein Laser als Lichtquelle hat mehrere Vorteile: Er ist gut kollimierbar, kostengünstig und kompakt. Abschnitt 5.2.9 beschreibt die Konstruktion des *Projektors* und den Entwurf der Laserleistungsregelung und Sicherheitsüberwachung.
- Der Fokus der Kamera soll variabel sein. Eine *Fokussiereinrichtung* ermöglicht optimal scharfe Abbildung in jedem gewünschten Entfernungsbereich (siehe Abschnitt 5.2.10). Wenn hochgenau modelliert werden soll, wird auf den Nahbereich fokussiert. Als Explorationssensor ist der Fokus auf die Ferne eingestellt.
- In Abschnitt 5.2.11 wird der Algorithmus der *Bildprozessierung* dargelegt.
- Die konkrete Umsetzung der *Konfidenzbewertung der Messwerte* beschreibt Abschnitt 5.2.12.
- Alle Komponenten müssen effektiv zusammenarbeiten. Dies wird durch ein integriertes *Systemdesign* gewährleistet (Abschnitt 5.2.13).
- Das *Designkonzept* wird in Abschnitt 5.2.14 erläutert.

5.2.1 Aktive Triangulation

Maßgeblich für die geometrische Auslegung des Triangulationsscanners ist der Konflikt zwischen großem Blickwinkel und hoher Präzision (vgl. Abschnitt 3.1): Ein großer Blickwinkel geht nach Gleichung (3.11) zu Lasten der Präzision. Der Basisabstand ist dabei aufgrund der Baugröße und zunehmender Abschattung begrenzt, ebenso wie die Auflösung des Sensorelements. Es muss also unter Berücksichtigung der allgemeinen Anforderungen und Abmessungen der Bauelemente eine möglichst effektive Auslegung gefunden werden.

Um möglichst kleine Abmessungen zu erreichen, wird die Scangeometrie „Laserscanner mit fester Kameraposition“ nach Abbildung 3.3a ausgewählt. Das Messlicht soll in einer Achse abgelenkt werden und der Detektor eindimensional sein (siehe Abschnitt 5.2.7).

Das Prinzip des *VR-SCAN* ist in Abbildung 5.1a ersichtlich. Die Abbildung ist maßstabsgetreu und ermöglicht daher einen Eindruck von den Größenverhältnissen. Das Messprinzip ist zweidimensional und auf die Zeichenebene begrenzt. Der vom Scannerspiegel abgelenkte Messstrahl spannt den Scanbereich auf, der geschnitten mit dem Sichtbereich des Empfängers den Messbereich zwischen den Punkten A und B ergibt.

Abbildung 5.1b ist angelehnt an das Grundprinzip der Triangulation aus Abbildung 3.1a, jedoch ist die Kamera um den Winkel Φ geneigt. Dadurch kann der Sichtbereich der Kamera bestmöglich mit dem Scanbereich in Deckung gebracht werden. Zusätzlich wird die Fokusposition df berücksichtigt. Die Scannergeometrie ist demnach definiert durch die konstanten Größen Basisabstand B , Kamera-Neigungswinkel Φ , den Verschiebungen S_1 (Linse) und S_2 (Detektor), sowie dem Abstand der Linse zum Detektor F . Die Detektorlänge L legt mit F den Blickwinkel fest. Veränderliche Größen sind der Scanwinkel α

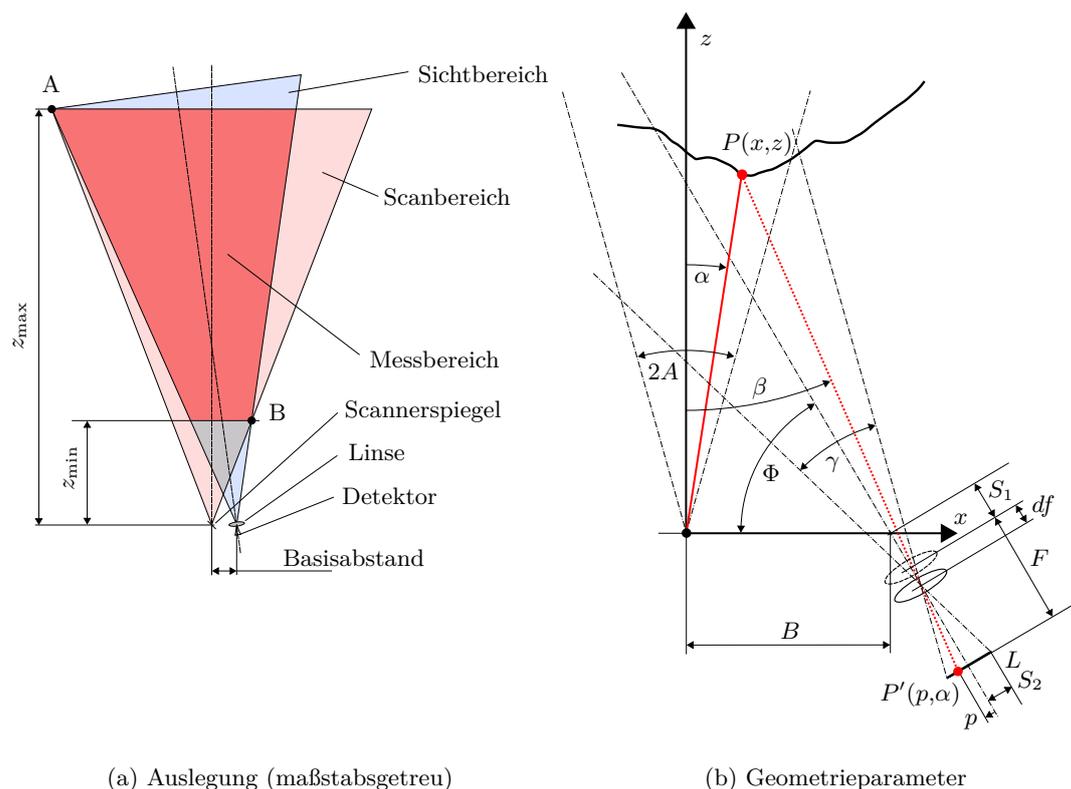


Abbildung 5.1: Messgeometrie VR-SCAN

und der Triangulationswinkel β , die Fokusposition df und schließlich die Bildkoordinate p .

Nach Abbildung 5.1b gilt wie in Gleichung (3.1) bei der allgemeinen Triangulation

$$x = z \tan(\alpha) , \quad (5.4)$$

und gleichzeitig

$$\beta = \arctan \left(\frac{B - x + \cos(\Phi)(S_1 + df)}{z + \sin(\Phi)(S_1 + df)} \right) . \quad (5.5)$$

Eine ideale Linse vorausgesetzt, gilt für β auch

$$\beta = \frac{\pi}{2} - \Phi - \arctan \left(\frac{p}{F - df} \right) . \quad (5.6)$$

Zur Bestimmung von p wird der Parameter S_2 benötigt, der die Position des Zeilensensors relativ zur optischen Achse beschreibt. Da der Neigungswinkel Φ jedoch sehr stark mit S_2 korreliert, wird in Folge $S_2 = L/2$ gesetzt. Es wird p also stets von der Sensormitte aus gezählt.

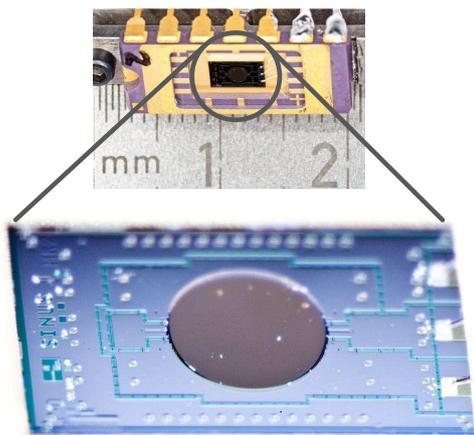


Abbildung 5.2: MEMS Spiegel Typ DM1D

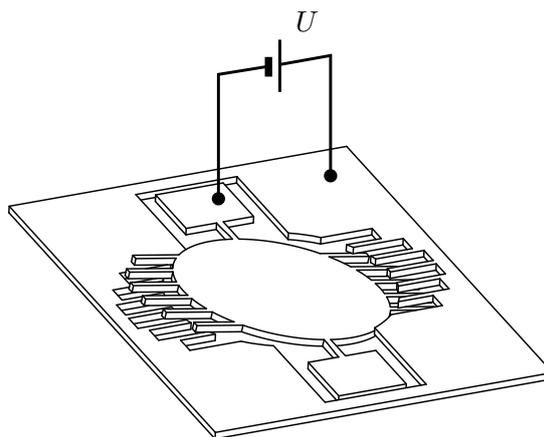


Abbildung 5.3: MEMS Antriebsprinzip

Gleichung (5.5) lässt sich nun nach z auflösen sowie die Gleichungen (5.6) und (5.4) einsetzen. Aus Gründen der Lesbarkeit wird in Folge $S_1, df = 0$ vorausgesetzt:

$$z = \frac{B}{\tan(\alpha) + \cot(\Phi + \arctan(p/F))} \quad (5.7)$$

Mit den Gleichungen (5.4) und (5.7) können nun die Messgrößen (α, p) in kartesischen Koordinaten (x, z) ausgedrückt werden.

Nimmt man eine radiale Verzeichnung des Kamerabildes an, so kann die Bildkoordinate p nach Zhang [109] zu

$$\hat{p} = p + k_1 p^3 + k_2 p^5 \quad (5.8)$$

mit den Korrekturfaktoren k_1 und k_2 korrigiert werden.

5.2.2 MEMS Mikrospiegel

Der Scannerspiegel lenkt das Messlicht um den Winkel α ab (vgl. Abbildung 5.1b). Der mechanische Winkel des Spiegels ist dabei $\alpha/2$, er ist stets halb so groß wie die optische Ablenkung.

In herkömmlichen Scannern wird der Messstrahl meist mit rotierenden Spiegeln oder Polygonrädern, Galvanometer-Spiegeln oder holographischen Spiegeln abgelenkt. In vielen Konfigurationen (besonders bei synchronisierten Scannern) ist die Apertur des Spiegels von großer Bedeutung: Wenn das vom Objekt reflektierte Messlicht über einen Spiegel zur Kamera gelenkt wird, muss die Apertur des Spiegels wenigstens so groß wie die der Kamera sein. In der für den VR-SCAN ausgewählten Messgeometrie ist die Kamera jedoch fest und der Spiegel lenkt nur den Messlaserstrahl ab. Die Apertur des Spiegels ist daher lediglich durch den Durchmesser des kollimierten Laserstrahls begrenzt.

Tabelle 5.2: MEMS Mikrospiegel: Technische Daten

	Fraunhofer ISIT ^a		Fraunhofer IPMS ^b
Typ	Mimosa	1mm-17k-05k	DM1D
Gehäuse	auf Platine	Vakuum	DIL 14
Achsen	2	2	1
Resonanzfrequenz [Hz]	500 / k. A.	520 / 16800	250
max. Scanamplitude	20°	> 15° / > 15°	14,6°
Betriebsspannung [V]	70	< 10 / < 30	16
max. Spannung [V]	120		22
Spiegeldurchmesser [mm]	1,5	1	1,5

^a Fraunhofer-Institut für Siliziumtechnologie

^b Fraunhofer-Institut für Photonische Mikrosysteme

Die Idee ist, einen MEMS Mikrospiegel (Abbildung 5.2) zu verwenden. MEMS Spiegel unterliegen kaum messbarem Verschleiß [105], haben sehr kleine Abmessungen und der Betrieb ist lautlos. Der Spiegel soll nach den Anforderungen in Tabelle 5.1 ca. 40° gesamten optischen Scanwinkel erreichen, was einer mechanischen Auslenkung von $\pm 10^\circ$ entspricht. Die Scanfrequenz muss einerseits niedrig genug sein, um der Kamera zur Belichtung genügend Zeit zu lassen. Andererseits soll sie aber möglichst hoch für eine effektive Zeilenmessung sein: Der Scanbereich soll eine ausreichend hohe Messdichte in α -Richtung liefern. Sinnvollerweise liegt daher die Scanfrequenz ca. zwei Größenordnungen unter dem Messtakt (Bildwiederholrate des Zeilensensors) von mehr als 10 kHz (nach Tabelle 5.1), also unter 1 kHz. Diese grob umrissenen Anforderungen wurden zur Zeit der Auslegung von den MEMS Spiegel Prototypen vom Fraunhofer ISIT und IPMS erfüllt. Tabelle 5.2 fasst die technischen Daten zusammen. Weitere Hersteller von MEMS Mikrospiegeln sind Lemoptix⁵ und Microvision⁶.

In Experimenten wurden MEMS Spiegel der Typen *DM1D* sowie *Mimosa* getestet. Alle Prototypen werden elektrostatisch angetrieben und in Resonanz betrieben. Die Spiegelrahmen sowie die beweglichen Spiegel selbst sind in unterschiedlichen Herstellungsprozessen in einem Stück aus Silizium geätzt. Die Torsionsfedern (gleichzeitig Festkörpergelenke) bestehen ebenfalls aus Silizium oder, im Fall von *Mimosa*, aus nachträglich aufgebrachteten Nickelbändchen. Die Spiegelfläche ist kreisförmig mit 1,5 mm Durchmesser.

Der Spiegel vom Typ *1mm-17k-05k* unterscheidet sich dadurch von den anderen beiden, dass er ein vakuumisiertes Gehäuse hat [54]. Daher fällt die Dämpfung durch Luft fast völlig weg. Zum Zeitpunkt der Auslegung war die Glasabdeckung parallel zur Spie-

⁵www.Lemoptix.com

⁶www.microvision.com

gelfläche im Ruhezustand, so dass ein Teil des auf den Spiegel gerichteten Messlichts vom Glas direkt unter dem Winkel $\alpha = 0^\circ$ in den Scanbereich reflektiert worden wäre. Diese störende Reflexion wurde später durch ein schiefgestelltes Schutzglas aus dem Scanbereich entfernt. Schließlich fiel aufgrund der geringen Scanfrequenz und Ansteuerungsspannung sowie nicht zuletzt der Verfügbarkeit die Entscheidung auf den Typ *DM1D* vom Fraunhofer IPMS.

Funktion

Der verwendete MEMS Mikrospiegel *DM1D* wird ausschließlich in Resonanz betrieben. Der Spiegel ist ein durch Luft gedämpfter harmonischer Oszillator. Um große Scanwinkel zu erreichen, wird er periodisch nahe der mechanischen Resonanzfrequenz f_0 angeregt. Die erzwungene Schwingung ist näherungsweise sinusförmig [56, 82].

Abbildung 5.3 zeigt schematisch das Antriebsprinzip: In Ruhe liegen Spiegelfläche und Rahmen in einer Ebene. Der Spiegel ist über zwei Festkörpergelenke gelagert. Wie im Bild ersichtlich, kann er frei auslenken, während der Rahmen und die Spiegellager gemeinsam fest mit einer tiefer liegenden Substratschicht verbunden sind (nicht dargestellt). Unter Auslenkung des Spiegels werden die Torsionsgelenke verdreht und erzeugen ein Rückstellmoment. Über kammförmige Elektroden zwischen feststehendem Rahmen und beweglichem Spiegel wird ein Kondensator gebildet. Dessen Kapazität ist abhängig vom Spiegelwinkel: In Ruhelage (Nulllage) ist sie maximal und nimmt bei Auslenkung durch den zunehmenden Abstand der Elektroden ab. Wird nun eine unipolare Spannung U an die Elektroden angelegt, wird dort eine elektrostatische Kraft proportional zur Kapazität erzeugt, welche stets anziehend wirkt. Die auf den gegenüberliegenden Seiten des Spiegels wirkenden Kräfte können also nur unter Auslenkung ein Antriebsmoment erzeugen. In Ruhelage sind die Richtungen der Kräfte deckungsgleich und das Antriebsmoment wird null. Theoretisch dürfte der Spiegel also nicht ohne externe Anregung anschwingen. Tatsächlich reichen in der Realität jedoch kleinste Asymmetrien aus, damit sich der Spiegel bei geeigneter Anregungsfrequenz in Bewegung setzt [56].

In Abbildung 5.4 ist der stationäre zeitliche Zusammenhang zwischen Antriebsspannung und Spiegelbewegung dargestellt: Letztere ist durch den sinusförmigen Verlauf des Scanwinkels α repräsentiert. Die rechteckförmige Antriebsspannung U erzeugt periodische Antriebskräfte, dargestellt durch Pfeile. Der zeitliche Verlauf der Kräfte ist nicht proportional zu U , er ist, wie die Kapazität, abhängig vom Spiegelwinkel $\alpha/2$ und nimmt in Richtung Ruhelage stark zu. In der Zeichnung wird dies durch Verschiebung der Kraftpfeile in Richtung Nulldurchgang verdeutlicht. Der Spiegel wird also in jeder Halbperiode der Schwingung in Richtung seiner Ruhelage gezogen. Folglich ist die Frequenz des Rechtecksignals f_U doppelt so groß wie die Bewegungsfrequenz des Spiegels f :

$$f_U = 2 \cdot f \quad (5.9)$$

Die Frequenz der erzwungenen Schwingung liegt oberhalb der mechanischen Resonanzfrequenz des Spiegels und es stellt sich ein Phasenversatz Δt_{ph} der Schwingung bezogen

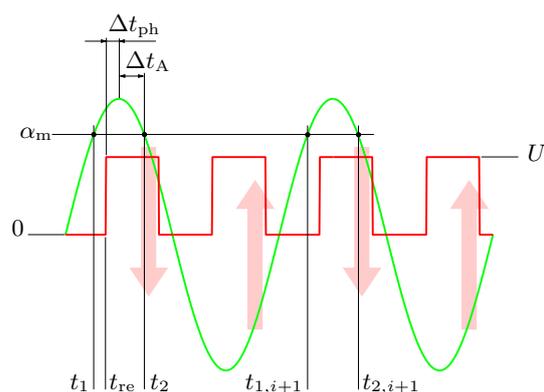


Abbildung 5.4: MEMS Schwingungsverlauf

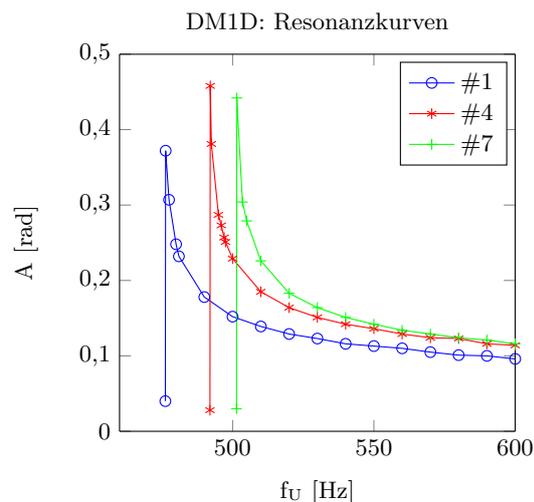


Abbildung 5.5: MEMS Resonanzkurven

auf das Ansteuersignal ein, mit der steigenden Flanke des Rechtecksignals t_{re} und dem Umkehrpunkt der Schwingung als Referenzen.

Abbildung 5.5 zeigt den experimentell bestimmten Verlauf der Resonanzkurven verschiedener DM1D Prototypen: Die optische Amplitude A oder Scanamplitude ist die maximale Ablenkung des Lasers durch den Spiegel. Die mechanische Auslenkung des MEMS-Spiegels ist dabei exakt halb so groß. Dargestellt ist die Scanamplitude A über der Ansteuerfrequenz f_U . Von hoher Frequenz aus betrachtet, steigt die Amplitude in Richtung Resonanzpunkt stark an, um dann unmittelbar einzubrechen. Der Grund dafür ist die Krafrichtung, die stets auf die Ruhelage gerichtet ist: Die Anregung ist somit nicht nur nicht harmonisch, sondern sie ändert im Nulldurchgang auch ihr Vorzeichen.

Die Schwingung wird daher auch immer von hohen Frequenzen aus initiiert, und sich f_0 von oben her genähert: Mit zunehmender Nähe zur Resonanzfrequenz f_0 nähert sich der Phasenwinkel zwischen maximaler Auslenkung und Krafeinleitung $\pi/2$. In Abbildung 5.4 ist dies gleichbedeutend mit $\Delta t_{ph} = 0$: Die Antriebskraft wirkt unmittelbar vor dem Nulldurchgang. Die Resonanzfrequenz kann allerdings nie exakt erreicht werden, da dann die Antriebskraft in Ruhelage wirken müsste, dort allerdings, wie oben beschrieben, kein Moment mehr erzeugt wird. Sinkt nun die Antriebsfrequenz weiter ab, verschiebt sich die Kraftresultierende über den Nulldurchgang hinaus, und wirkt somit sofort bremsend, da die Krafrichtung umgekehrt wird. Die Schwingung kommt zum Erliegen.

Um ausreichende Stabilität sicherzustellen, muss ein minimales Δt_{ph} garantiert werden, indem der Spiegel mit einer leicht höheren Frequenz als f_0 betrieben wird. Die exakte Resonanzfrequenz eines Baumusters variiert je nach Spiegel, die Kurven sind individuell deutlich unterschiedlich. Eine Regelung von Δt_{ph} ist also erforderlich (vgl. Abschnitt 5.2.4).

Modellierung der Spiegelbewegung

Aus messtechnischen Gründen (siehe nächsten Abschnitt) wird in Folge statt des mechanischen Spiegelwinkels $\alpha/2$ der doppelt so große optische Scanwinkel α betrachtet. In erster Näherung wird eine lineare Feder und Dämpfung angenommen und es gilt die Bewegungsgleichung des erzwungenen harmonischen Oszillators

$$J\ddot{\alpha} + d\dot{\alpha} + k\alpha = M(\alpha, U) , \quad (5.10)$$

mit dem Massenträgheitsmoment J , der Dämpfung d und der Federkonstante k . Das Antriebsmoment M ist periodisch, aber nicht harmonisch und nicht stetig. Es ist im Verlauf unbekannt. Die Lösung von Gleichung (5.10) kann daher durch eine Fourierreihe angegeben werden. Dabei dominiert die Grundwelle: Die Bewegung des Spiegels beschreibt aufgrund der geringen Antriebskräfte und der hohen Güte einen fast idealen Sinus mit der erzwungenen Frequenz f , der aufgrund der nicht kontinuierlichen Impulse des Antriebs von harmonischen Oberwellen überlagert ist. Der Einfluss der Oberwellen ist bei der erforderlichen Präzision zur Bestimmung von α jedoch nicht vernachlässigbar.

Legt man eine Kosinusbewegung zugrunde, wird die Antriebskraft in gleicher Größe, aber in entgegengesetzter Richtung jeweils nur im ersten und dritten Quadranten der Schwingung mit Periodenlänge T eingepreßt (vgl. Abbildung 5.4). Den symmetrischen mechanischen Aufbau des Spiegels vorausgesetzt, muss das Bewegungsmodell die Symmetriebedingung

$$\alpha(t) = -\alpha(t + T/2) \quad (5.11)$$

erfüllen.

Die Bewegung wird als Fourierreihe begrenzt auf die Oberwellen modelliert:

$$\alpha = \sum_k A a_k \cos(k(2\pi f t - \varphi_k - \varphi_0)) \quad \left| \begin{array}{l} k = \{1, 3, \dots\} \\ \varphi_1 = 0, a_1 = 1 \end{array} \right. . \quad (5.12)$$

Die Reihe enthält alle ungeraden Harmonischen der Anregung mit Grundfrequenz f , was die Bedingung (5.11) erfüllt. Die Parameter der Oberwellen (Phase φ_k und Amplitude a_k) sind in Abhängigkeit von der Grundwelle (Phase φ_0 , Amplitude A und Frequenz f) modelliert.

Normiert man t in Gleichung (5.12) auf $\hat{t} = tf$ und die Phasenwinkel auf $\hat{\varphi} = \varphi/(2\pi)$ mit Werten jeweils im Intervall $[0..1]$, so ist

$$\alpha = \sum_k A a_k \cos(2\pi k(\hat{t} - \hat{\varphi}_k - \hat{\varphi}_0)) \quad \left| \begin{array}{l} k = \{1, 3, \dots\} \\ \hat{\varphi}_1 = 0, a_1 = 1 \end{array} \right. \quad (5.13)$$

lediglich von \hat{t} abhängig und unabhängig von der Frequenz.

Tabelle 5.3: Modellierung des MEMS Mikrospiegel: Zahlenwerte

k	3	5	7	9	11
a_k	$1,05 \cdot 10^{-2}$	$2,76 \cdot 10^{-3}$	$1,44 \cdot 10^{-3}$	$1,58 \cdot 10^{-3}$	$5,83 \cdot 10^{-4}$
$\hat{\varphi}_k$	0,52	0,54	0,53	0,66	0,10
A [rad]	0,33				
$\hat{\varphi}_0$	$2,73 \cdot 10^{-2}$				

gemessen an Spiegel Typ DM1D Seriennr. 8

Zur Verifikation wurde die Schwingung an einem Prüfstand kontinuierlich mit einem PSD⁷ direkt vermessen [83]. Die Messgenauigkeit des PSD war jedoch nicht ausreichend, um die geringen Auswirkungen der Oberwellen zu detektieren. Daher wurde die CMOS Kamera des VR-SCAN selbst zur Vermessung des Spiegels verwendet. Dadurch konnten die Oberschwingungen bis zur elften Harmonischen der Anregungsfrequenz nachgewiesen und modelliert werden. Tabelle 5.3 listet exemplarisch die Zahlenwerte der Parameter einer Spiegelkalibrierung nach Gleichung (5.13) auf.

Temperaturverhalten

Zu Beginn der Entwicklung wurde versucht, die Spiegel mit einem festen Ansteuersignal anzusteuern und ungerregelt zu betreiben. Der Scanwinkel wurde synchron zur Ansteuerung nach dem o. a. Bewegungsmodell geschätzt. Die Bewegungsparameter A , a_k , $\hat{\varphi}_0$, $\hat{\varphi}_k$ aus dem Bewegungsmodell (5.13) blieben auch über längere Zeiträume hinweg fast unverändert, sie änderten sich jedoch deutlich mit der Umgebungstemperatur und der Leistung des reflektierten Lasers. Es wurden also Experimente durchgeführt, in denen die Temperatur bei konstanter Ansteuerung des Spiegels verändert wurde. Die Amplitude wurde dabei mit Hilfe einer Kamera gemessen, welche den vom Spiegel abgelenkten und auf eine unbewegliche Ebene projizierten Laserstrahl beobachtete. Abbildung 5.6a zeigt den Drift der Scanamplitude über den Zeitraum von ca. 15 Stunden, während der Scanner in einem Klimaschrank dem grün dargestellten Temperaturverlauf ausgesetzt war. Man erkennt eindeutig einen umgekehrten, annähernd linearen Zusammenhang. Die Amplitude schwankte um fast 20 mrad zwischen 12°C und 35°C.

Auch der Laser selbst kann den Spiegel erwärmen, wie Bild 5.6b zeigt: Eine sprunghafte Erhöhung der Laserleistung von 0,07 auf 1,8 mW⁸ führt zu einer fast unmittelbaren Veränderung der Amplitude um ca. 1 mrad. Innerhalb von weniger als 0,1 Sekunden ändert der Spiegel sein Verhalten deutlich: Einem kleinen Überschwingen in Richtung

⁷Position Sensitive Device, S1352 von Hamamatsu (34x2,5mm)

⁸Solche Sprünge in der Laserleistung sind nach der Anforderung „modulierbare Sendeleistung“ zu erwarten.

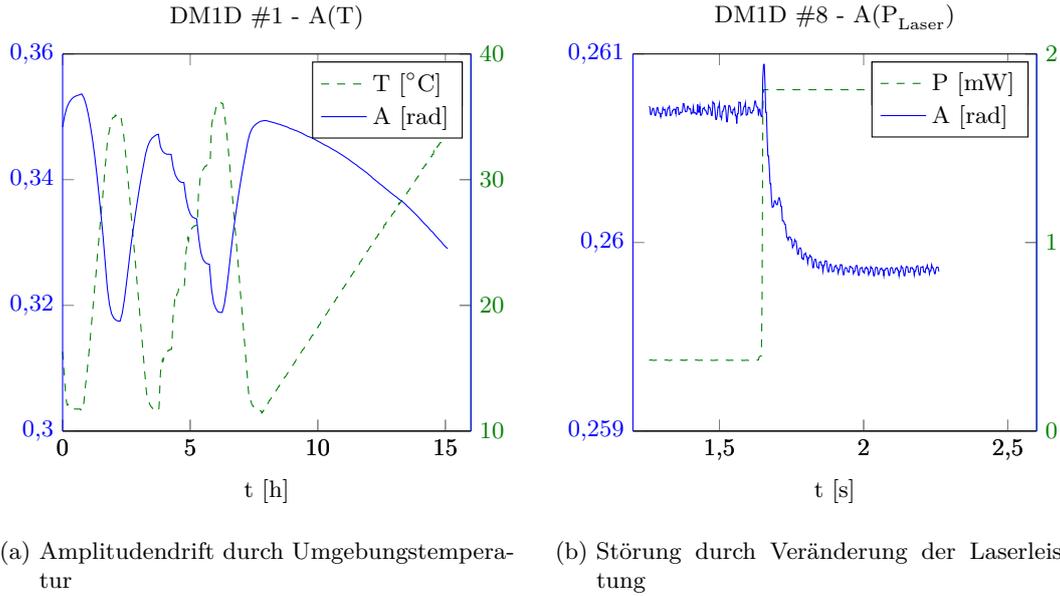


Abbildung 5.6: MEMS Spiegel Typ DM1D: Temperaturverhalten

der Leistungserhöhung folgt ein steiler Abfall der Schwingungsamplitude mit asymptotischem Auslauf. Rechnerisch ist eine derart schnelle Erwärmung des Spiegels durch den Laser nachvollziehbar: Der Spiegelfläche wird innerhalb von 0,25 s die zusätzliche Wärmemenge

$$Q = \frac{\Delta P_1 \cdot (1 - R)}{\Delta t} = \frac{(1,8 - 0,07) \cdot 0,1}{0,25} \left[\frac{\text{mW}}{\text{s}} \right] = 6,9 \cdot 10^{-4} \text{ J} \quad (5.14)$$

mit der Laserleistung P_1 und dem angenommenen Reflexionsgrad der Spiegelfläche $R = 0,1$ zugeführt. Nach Schenk [82] ist die Spiegelfläche mit 1,5 mm Durchmesser etwa $20,5 \mu\text{m}$ dick, also beträgt mit der Dichte von Silizium ($2,336 \text{ g/cm}^3$) die Spiegelmasse $m = 8,5 \cdot 10^{-5} \text{ g}$. Daraus folgt mit der spezifischen Wärmekapazität von Silizium $c = 703 \text{ J/(kg K)}$ für den Temperaturanstieg

$$\Delta T = \frac{Q}{m \cdot c} = \frac{6,9 \cdot 10^{-4} [\text{J}]}{8,5 \cdot 10^{-5} [\text{g}] \cdot 703 [\text{J}/(\text{kgK})]} = 0,7 \text{ K} . \quad (5.15)$$

Dieser Wert liegt im Verhältnis zur Amplitudenänderung ($1/0,7 [\text{mrad/K}]$) erwartungsgemäß in der Größenordnung des Experimentes in der Klimakammer ($20/23 [\text{mrad/K}]$).

Die Temperaturabhängigkeit der Amplitude wird dadurch erklärt, dass sich zwischen Siliziumspiegel und Trägersubstrat aus Keramik bzw. dem Klebstoff zwischen Substrat und Spiegel thermische Spannungen einstellen: Die Wärmeausdehnungskoeffizienten unterscheiden sich leicht, außerdem ist der Wärmeeintrag durch den Laser nicht ortsunabhängig. Dies führt zu einer veränderten Vorspannung der Torsionsfedern. Faktisch

ändert sich dadurch die Federkonstante und in Folge verschiebt sich die Resonanzfrequenz. Indikator für diesen Effekt ist die Phasenveränderung, was in den Experimenten ebenfalls nachgewiesen werden konnte. Die signifikante Reaktion der Spiegelbewegung auf die Temperatur erfordert also eine Regelung der Amplitude und Phase (siehe Abschnitt 5.2.4). Zudem wird vermutet, dass außer der Temperatur die Luftfeuchtigkeit ein ähnlich starker Einflussfaktor auf das Spiegelverhalten ist.

5.2.3 Indexmarke

Die Genauigkeit des Scanwinkels α hat direkte Auswirkungen auf das Ergebnis der Triangulation. Nach Gleichung (3.6) folgt für die erforderliche Winkelpräzision mit $z = 1000$ mm, $\alpha = 0,35$ rad und $\Delta z = 1$ mm gemäß den Anforderungen aus Tabelle 5.1:

$$\Delta\alpha_{\max} = 53 \mu\text{rad} \quad (5.16)$$

Die oben nachgewiesenen Schwankungen der Amplitude aufgrund veränderlicher Temperatur und Laserleistung (Abbildung 5.6) übersteigen diese hohe Anforderung bei Weitem. Es ist also eine präzise Messung des Scanwinkels α erforderlich.

Die verwendeten Mikrospiegel verfügen über keinerlei integrierte Scanwinkelerfassung. Die kontinuierliche Erfassung der Messgröße α ist auf direktem Weg problematisch, da aufgrund der kleinen Bauweise der Spiegel kaum Platz für eine Positionserfassung bleibt. Direkte Methoden wären z. B. magnetische oder kapazitive Messelektroden [102]. In [30] werden Dehnungsmessstreifen in den Torsionsfedern zur Winkelmessung genutzt. Auch die elektrostatischen Antriebselektroden selbst kommen in Betracht, indem deren winkelabhängige Kapazität ausgewertet wird [61, 82]. Generell ist aber eine hohe Genauigkeit auf diesem kleinen Raum sehr schwierig zu erzielen. Indirekte (optische) Methoden benötigen naturgemäß mehr Platz, sind aber genauer. Beispiele wären die Positionsmessung eines zusätzlich abgelenkten Pilotlasers (z. B. über ein PSD). Sofern der Spiegel halbdurchlässig gestaltet ist, kann auch der Messlaser hinter dem Spiegel erfasst werden [83].

Alternativ zur kontinuierlichen Messung kann die Bewegung des Spiegels auch mit Hilfe einer Lichtschranke und eines damit synchronisierten Bewegungsmodells geschätzt werden [20, 98, 105]. Dieser Ansatz wird auch in dieser Arbeit verfolgt: Der vom Spiegel abgelenkte Laserstrahl wird von einer Glasscheibe teilweise reflektiert und überstreicht so mit der Bewegung des Spiegels einen Fotodetektor. Abbildung 5.7 verdeutlicht die Umsetzung einer solchen Indexmarke: Durch Verwendung eines 2x1 Fotodiodenarrays kann der Zeitpunkt beim Passieren der Messstelle bei $\alpha = \alpha_m$ genau durch die Gleichheit der Fotoströme $I_1 = I_2$ bestimmt werden. Diese Methode ist unabhängig vom Umgebungslicht und der Laserleistung und einfach auszuwerten. Im Gegensatz zu ähnlichen Ansätzen in der Literatur [20, 98, 105] kommt diese Lösung statt mit zwei mit nur einer Messstelle bei α_m aus. Weitere Vorteile sind:

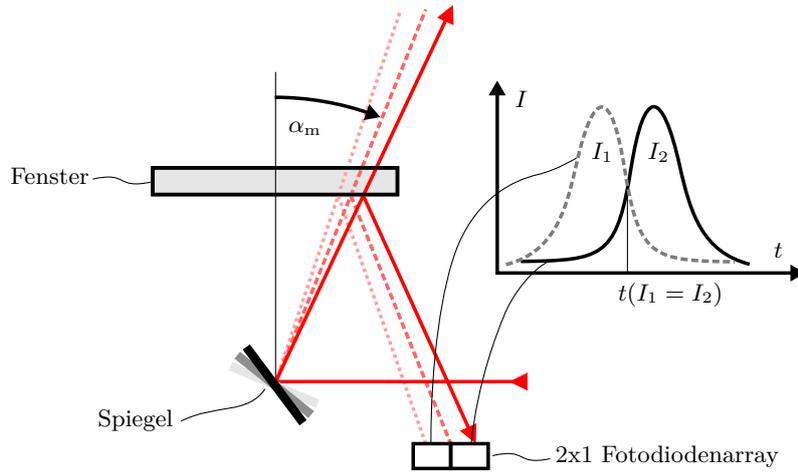


Abbildung 5.7: Indexmarke

- einfache und kostengünstige Konstruktion
- absolute Messung von Amplitude, Phase und Offset
- minimaler mechanischer und optischer Aufwand
- Verwendung des Schutzfensters vermeidet direkte Beeinflussung des Strahlengangs
- einfacher Aufbau der Elektronik
- Präzision trotz Leistungsmodulation des Lasers möglich

Die Auswertung der Indexmarke geschieht wie folgt: Pro Schwingungsperiode werden zwei Zeitpunkte t_1 und t_2 generiert, woraus sich die Zeitdifferenzen aus Abbildung 5.4 bilden lassen:

$$\Delta t_A = \frac{t_1 - t_2}{2} \quad (5.17)$$

$$\Delta t_{\text{ph}} = \frac{t_1 + t_2}{2} - t_{\text{re}} \quad (5.18)$$

Normiert man Gleichung (5.17) durch Multiplikation mit der Frequenz f zu $\Delta t_A \cdot f = \hat{t}_A$, so gilt für die Amplitude der Grundschiwingung aus der Bewegungsgleichung (5.12)

$$A = \frac{\alpha_m}{\cos(2\pi \hat{t}_A)} \quad (5.19)$$

Aus Gleichung (5.17) folgt direkt der normierte Phasenwinkel

$$\hat{\varphi}_0 = f \Delta t_{\text{ph}} \quad (5.20)$$

Die Messwerte dienen zum Einen der Synchronisierung des Spiegel-Bewegungsmodells mit der Realität und zum Anderen der Regelung von Amplitude und Phase, wie im nächsten Abschnitt beschrieben.

5 Entwicklung des VR-SCAN

Die mechanische und elektronische Auslegung der Indexmarke orientiert sich an der oben angegebenen Präzisionsanforderung (5.16). Daraus ergeben sich zwei Bedingungen:

- *Der Ort α_m der Messung muss konstant bleiben.* Er ist abhängig von der Position des Fotodiodenarrays, des Fensters und dessen Neigung. Die Bauteile müssen also fest in einem Gehäuse verankert sein. Sei l die Gesamtlänge des Strahlengangs der Indexmarke vom Spiegel über das Fenster bis zur Messstelle, dann gilt näherungsweise für dessen örtliche Präzision in x -Richtung

$$\Delta x_{\text{index}} = l \cdot \tan(\Delta \alpha_{\text{max}}) . \quad (5.21)$$

Mit $l = 20 \text{ mm}$ und Gleichung (5.16) ergibt sich Δx_{index} zu $1 \mu\text{m}$. Auf der gleichen Länge ist die Wärmeausdehnung des Gehäuses nicht vernachlässigbar: Sie beträgt

$$\Delta x_{\text{index}} = \Delta T \cdot l \cdot \alpha_T ,$$

mit dem spezifischen Wärmeausdehnungskoeffizient α_T . Im ungünstigsten Fall gilt folglich die Bedingung

$$\Delta T \cdot \alpha_T < \tan(\Delta \alpha_{\text{max}}) . \quad (5.22)$$

Wird das Gehäuse, wie allgemein üblich, aus Aluminium gefertigt, so beträgt $\alpha_T = 23,2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Bei einer Temperaturdifferenz von $\Delta T = 50 \text{ K}$ wird die linke Seite von Gleichung (5.22) gleich $1,16 \cdot 10^{-3}$, womit die Bedingung nicht erfüllt ist. Das Gehäuse der Indexmarke muss daher aus einem Material mit einem deutlich geringeren Wärmeausdehnungskoeffizienten als dem von Aluminium gefertigt werden ($\alpha_T < 1,06 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), oder die Wärmedehnung muss in alle Richtungen gleichmäßig erfolgen (Winkeltreue). Als Material kommt z. B. Invar in Frage (mehr zur thermischen Auslegung des Scankopfes in Abschnitt 5.3.2).

- *Die Messung muss zeitlich präzise sein.* Die erforderliche Präzision der Messung der Zeitpunkte $t_{1,2}$ ist von der Bahngeschwindigkeit v_m des Lasers an der Messstelle α_m abhängig. Betrachtet man nur die Grundschiwingung mit Amplitude A und Frequenz f , sowie l als Radius, so gilt:

$$v_m = -A \sin \left(\arccos \left(\frac{\alpha_m}{A} \right) \right) \cdot 2 \pi f l . \quad (5.23)$$

Mit den Gleichungen (5.21) und (5.23) folgt für die zeitliche Auflösung der Messung

$$\Delta t_{\text{index}} < \frac{\Delta x_{\text{index}}}{v_m} . \quad (5.24)$$

Mit den konservativen Werten $A = 0,4 \text{ rad}$, $f = 250 \text{ Hz}$ und $\alpha_m = 0,2 \text{ rad}$ beträgt $v_m = 9024 \text{ mm/s}$. Legt man $\Delta x_{\text{index}} = 1 \mu\text{m}$ zugrunde, wie oben hergeleitet, so gilt $\Delta t_{\text{index}} < 111 \text{ ns}$. Die Anstiegszeiten der elektronischen Bauteile (Komparatoren) müssen also entsprechend kurz sein.

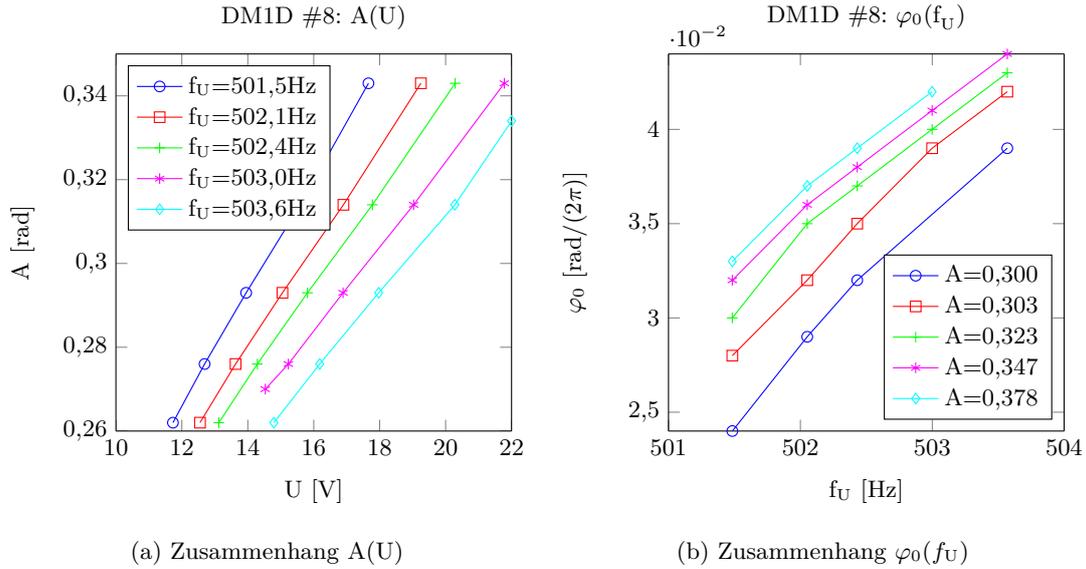


Abbildung 5.8: MEMS Spiegel Typ DM1D: Systemverhalten im Arbeitspunkt

5.2.4 Amplituden- und Phasenregelung

Aufgrund des Temperaturverhaltens und individueller Unterschiede aufgrund von Fertigungstoleranzen der Spiegel muss sowohl die Amplitude als auch die Phase geregelt werden. Betrachtet wird hier lediglich die Grundschiwingung. Es wird angenommen, dass mit konstant geregelter Amplitude und Phase auch die Oberschwingungen konstant sind und der Spiegel dem frequenzunabhängigen Bewegungsmodell in Gleichung (5.13) folgt.

Die Amplitude wird durch die Höhe des Ansteuersignals U gesteuert. Der Zusammenhang zwischen Antriebsspannung und Scanamplitude ist in Abbildung 5.8a dargestellt. Es wurden bei einem Spiegelprototyp mehrere Messreihen unter leicht veränderten Ansteuerfrequenzen f_U nahe des Resonanzpunktes $2f_0$ durchgeführt. Wie in [82] hergeleitet, besteht näherungsweise ein linearer Zusammenhang $A \sim U$. Die Steigung dA/dU oder die Effektivität der Ansteuerung wächst mit kleiner werdendem Abstand zur Resonanz.

Die Phase kann nur durch Variation der Ansteuerfrequenz f verändert werden. Die Frequenz eines Spiegels mit konstant geregelter Phase ist folglich variabel. Abbildung 5.8b zeigt den Verlauf des normierten Phasenwinkels über der Ansteuerfrequenz bei verschiedenen Amplituden. Wie bei $A(U)$ ist auch hier das Verhalten annähernd linear.

Es wurde ein Kaskadenregler mit voneinander unabhängigen Amplituden- und Phasenregler realisiert (Abbildung 5.9). Regelgrößen sind die mittels der Indexmarke gemessenen Zeitdifferenzen Δt_A und Δt_{ph} für Amplitude bzw. Phase (vgl. Abbildung 5.4). In der Realität ist zwar die Phase nicht unabhängig von U , und auch zwischen A und f_U gibt

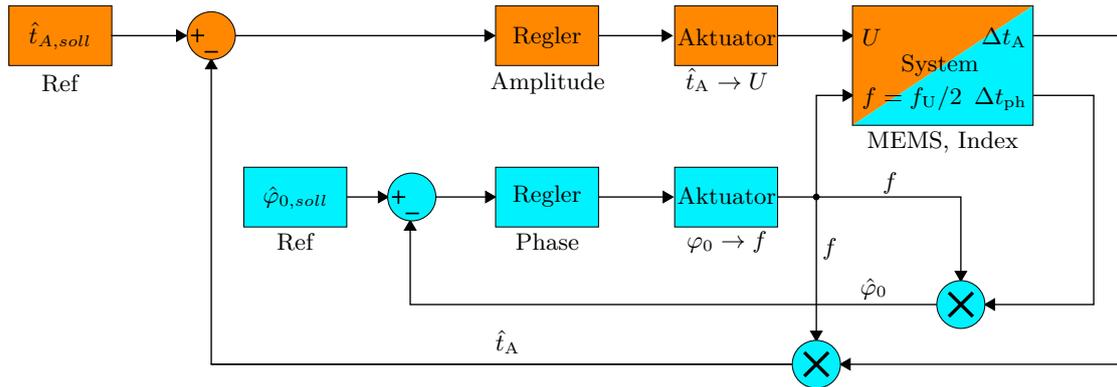


Abbildung 5.9: MEMS Amplituden- und Phasenregelung

es eine deutliche Abhängigkeit (siehe Resonanzkurven in Abbildung 5.5). Dennoch kann diese Verkopplung vernachlässigt werden, sofern die Verstärkung des Amplitudenreglers sehr viel größer gewählt wird als die des Phasenreglers. Die Priorisierung der Amplitudenregelung stellt sicher, dass das Messfeld konstant bleibt und die Indexmarke funktioniert (insofern, dass A nicht unter α_m sinken kann). Alternativ zur Kaskadierung kann die Verkopplung der Regelgrößen auch berücksichtigt werden, indem ein Mehrgrößenregler implementiert wird. In der Praxis konnte jedoch darauf verzichtet werden.

Die Regler nutzen die frequenzunabhängigen Führungsgrößen $\hat{t}_A = \Delta t_A \cdot f$ für die Amplitude und $\hat{\varphi}_0$ für die Phase. In der Rückführung werden die gemessenen Regelgrößen durch Multiplikation mit der Spiegelfrequenz unabhängig von der momentanen Frequenz gemacht. Die Aktoren verstärken die Reglerausgänge jeweils mit Faktoren, die um den vermessenen Arbeitspunkt (nach Abbildung 5.8) linearisiert sind. Daraus wird das rechteckförmige Ansteuersignal mit Höhe U und Frequenz $f_U = 2f$ erzeugt.

Um bleibende Regelabweichungen zu eliminieren, sind beide Regelkreise mit PI -Reglern ausgestattet. Der Integralteil der Regler summiert die Regelabweichungen auf und gleicht so die bleibenden Fehler der Proportionalglieder aus. Die Reglerabweichungen werden als Maß für die Qualität der Schwingung mit jedem Messwert zusammen ausgegeben. Störungen des Systems z. B. durch Stöße können so detektiert werden.

5.2.5 Detektor

Als Detektor wurde für erste Experimente der frei verfügbare CMOS Zeilensensor 1421 [40] von Fairchild Imaging⁹ gewählt, da er eine gute Auflösung bei passender Größe bietet, rauscharm und schnell ist. Für Vorabtests war der Sensor auch in einer CameraLink Kamera (Fairchild Owl) verfügbar. Die Zeilenrate beträgt maximal 38,2 kHz bei 2048x1 Pixel mit je 12 Bit Auflösung. Damit erfüllt der CMOS 1421 die Anforderung nach hohem Messtakt, und auch die Auflösung ist hoch genug für präzise Messungen. Die Länge

⁹www.fairchildimaging.com

des Chips ist mit gut 14 mm klein genug, um damit eine kompakte Kamera zu konstruieren. Nachteilig ist die quadratische Pixelform und damit die geringe lichtempfindliche Fläche von $7 \times 7 \mu\text{m}^2$.

Der CMOS 1421 ist über JTAG¹⁰ frei konfigurier- und steuerbar. Die belichtete Zeile kann gepuffert und gleichzeitig zur Belichtung der nächsten Zeile ausgelesen werden. Gerade und ungerade Pixel werden über je einen Port mit 40 MHz ausgelesen. Die Steuerung des CMOS 1421 soll über ein FPGA erfolgen.

5.2.6 Synchronisierung von Scanner und Detektor

Die verwendeten MEMS Spiegel schwingen mit $f \approx 250 \text{ Hz}$. Die Zeilenrate des Detektors soll in festem Verhältnis zu f stehen. Da f aufgrund der Phasenregelung geringfügig variabel ist, wird ein Faktor gewählt, der den CMOS Chip nicht am absoluten Limit betreibt. In einer beispielhaften Auslegung wird festgelegt, dass die Zeilenrate 140-mal größer als die MEMS Frequenz sein soll, also ca. 35 kHz erreicht. Durch einen ganzzahligen Faktor sind die Scanwinkel in jeder Halbperiode jedoch deckungsgleich. Infolgedessen sinkt die Anzahl der aufgelösten Winkelschritte pro Periode um die Hälfte auf 70. Bei 40° Scanwinkel beträgt die Auflösung folglich $40^\circ/70 = 0,57^\circ$ (10 mrad).

Indem ein nicht ganzzahliger Faktor gewählt wird, entsteht mit jeder Spiegelperiode ein Versatz des Messstrahles, wodurch die Winkelauflösung bei langsamen Bewegungen verbessert wird. Beträgt der Faktor 140,5, so wird erreicht, dass die Punkte in den beiden Halbperioden des Hin- und Rückwegs der Schwingung um den halben Punktabstand versetzt zueinander liegen, wodurch die Winkelauflösung verdoppelt wird. Der Scanbereich wird so auf 140 Winkelschritte pro Periode aufgeteilt.

Fügt man dem Faktor einen weiteren Anteil von 2^{-4} zu 140,5625 hinzu¹¹, so trifft durch dieses *Interlacing* nach 16 Schwingungsperioden der Messpunkt wieder exakt die Anfangsposition. Die mittlere Winkelauflösung wird (bei einem Scanwinkel von 40°) von 10 mrad (siehe oben) um das sechzehnfache auf $0,036^\circ$ (0,625 mrad) verbessert. Damit ist die Anforderung von 1,67 mrad erfüllt. In x -Richtung ist die Auflösung entfernungsabhängig. Der Messpunktabstand beträgt nativ bei 140 aufgelösten Punkten 1,3 – 5,2 mm und mit Interlacing und 2240 Punkten 0,08 – 0,33 mm.

5.2.7 Geometrische Auslegung

Die Geometrieparameter wurden ausgelegt, wie in Abbildung 5.1a dargestellt: Der Scanbereich und der Sichtbereich der Kamera sollen sich so überschneiden, dass von $z = 250 \text{ mm}$ bis 1000 mm jeweils die gesamte Detektorlänge belichtet werden kann.

Für die konkrete Auslegung werden a priori die folgenden Parameter festgelegt:

¹⁰Joint Test Action Group

¹¹Die Nachkommastellen sind zur Basis 2 gewählt, um die Verarbeitung in einem FPGA zu erleichtern.

Tabelle 5.4: Geometrieparameter des VR-SCAN

Basisabstand	B	60	mm	*
Kamera-Neigungswinkel	Φ	82	°	
Abstand Linse - x -Achse	S_1	0	mm	*
Abstand Linse - Detektor	F	28	mm	
Brennweite der Linse	f'	25	mm	
Scanamplitude	A	20	°	*
Detektorlänge	$L = 2S_2$	14.336	mm	*
mittlerer Empfangswinkel	γ	30	°	

* Vorgabe

- Der Basisabstand ($B = 60$ mm) aufgrund der notwendigen kleinen Abmessungen.
- Die Länge des Detektors aufgrund des ausgesuchten CMOS 1421 ($L = 14,336$ mm), und damit $S_2 = L/2 = 7,168$ mm.
- Die Scanamplitude ($A = 20^\circ$), um diese mit dem ausgewählten MEMS Scanner sicher und stabil zu erreichen.
- Der Messbereich von 250 – 1000 mm gemäß den Anforderungen aus Tabelle 5.1.
- Der Abstand $S_1 = 0$ mm.

Aus den Eckpunkten A und B des Messbereichs können mit den eben festgelegten Parametern und $df = 0$ mittels Gleichung (5.5) die Grenzwinkel des Sichtbereichs berechnet werden, woraus sich der optimale Neigungswinkel zu $\Phi = 82,05^\circ$ ergibt. Aus Gleichung (5.6) folgt rechnerisch $F = 26,6$ mm. Es muss noch der Fokusweg df berücksichtigt werden, welcher im Nahbereich nach der Linsengleichung (A.1) vorzugsweise gegen Null gehen soll, um für den Fernbereich mit zunehmendem df die Bildweite verkürzen zu können. Die Brennweite f' der Linse muss also niedriger als F sein, rechnerisch sind es 24 mm. Sie wird auf $f' = 25$ mm festgelegt, da dieser Wert verbreiteter ist. Entsprechend muss F erhöht werden, damit der Nahbereich bei $df = 0$ noch scharf abgebildet werden kann. Aus der Linsengleichung folgt $F = 27,8$ mm.

Tabelle 5.4 fasst die Geometrieparameter des VR-SCAN zusammen. Bis auf den gewünschten Empfangswinkel von $\gamma = 40^\circ$ (tatsächlich je nach Fokus $\approx 30^\circ$) werden alle Anforderungen aus Tabelle 5.1 erfüllt.

5.2.8 Empfangsoptik

Die Empfangsoptik besteht aus der Linse, die den Messpunkt auf den Bildpunkt auf dem Detektor abbildet, sowie ggf. einem optischen Filter. Die Fokussiereinrichtung ist

zwar ebenfalls in diese Baugruppe integriert, soll aber in Abschnitt 5.2.10 gesondert vorgestellt werden.

Strahlungsenergetische Betrachtung

Wie in Abschnitt 2.3.1 gezeigt, muss zur Maximierung der Messkonfidenz K_M die Signalstärke S am Detektor größtmöglich sein. Der ausgewählte Detektor hat eine lineare Charakteristik, daher gilt: S ist proportional zur empfangenen Lichtleistung. Die Linse soll also möglichst viel Messlicht auf die Pixel des Detektors lenken. Die Apertur der Empfangsoptik muss folglich groß sein, um die empfangene Lichtmenge zu maximieren.

Gleichzeitig soll der gesamte Messbereich auf den Zeilensensor abgebildet werden. Dies führt zu entgegengesetzten Anforderungen an die Linse: Eine große Apertur begrenzt die Schärfentiefe, welche jedoch groß sein soll, um möglichst wenig fokussieren zu müssen. Idealerweise deckt sie den gesamten Messbereich ab. Der Zusammenhang von Schärfentiefe und Apertur (Blende) wird in Abschnitt 5.2.10 und im Anhang A.2 näher erläutert.

Der Zusammenhang zwischen Leistung des Lasers, Apertur und empfangener Lichtleistung pro Pixel leitet sich wie folgt her: Das Messlicht projiziert den Punkt P auf das Objekt, und das Licht wird von dort aus diffus reflektiert. Die Reflexionseigenschaften der Objektoberfläche werden gemäß des Lambertischen Gesetzes modelliert (vgl. Anhang A.4). Die richtungsabhängig reflektierte Lambertische Strahlungsintensität I_d nach Gleichung (A.15) multipliziert mit dem Empfangsraumwinkel Ω ergibt die durch die Empfangsoptik fallende Leistung

$$P_d = \Omega I_d . \quad (5.25)$$

Die Gesamtleistung P_d wird dabei der Einfachheit halber als gleichverteilt angenommen. Umgerechnet auf die Leistung pro quadratischen Pixel gilt

$$P_p = P_d \frac{4 l_p^2}{s'^2 \pi} \quad \left| \quad s' \gg l_p , \quad (5.26)$$

mit der Pixellänge l_p und dem Bildpunktdurchmesser s' . Es wird angenommen, dass s' stets größer als die Pixellänge l_p ist (Für $s' \rightarrow l_p$ wird $P_p \approx P_d$).

Der Empfangsraumwinkel

$$\Omega = \frac{D^2 \pi}{4a^2} \quad (5.27)$$

mit der Apertur D der Empfangslinse und der Gegenstandsweite a eingesetzt in Gleichung (5.26) führt zusammen mit dem Lambertischen Gesetz (A.15) zu

$$P_p = P_1 \frac{I_0 \cos(\eta) D^2 l_p^2}{s'^2 a^2} . \quad (5.28)$$

Die Parameter I_0 und η sind objektspezifisch und stehen für die Reflektivität und den Beobachtungswinkel des Objektes. Die Lichtleistung pro Pixel ist demnach proportional

5 Entwicklung des VR-SCAN

zur Laserleistung und zum Quadrat der Apertur, sowie umgekehrt proportional zum Quadrat des Bildpunktdurchmessers und der Gegenstandsweite.

Für den Fall, dass auf Unendlich fokussiert wird ($F - df = f'$, vgl. Abbildung 5.1b), gilt

$$\frac{D}{a'} = \frac{s'}{a' - f'} . \quad (5.29)$$

Wird die Bildweite a' mit der Abbildungsgleichung (A.1) eliminiert und schließlich nach s' aufgelöst, folgt

$$s' = \frac{D f'}{a} . \quad (5.30)$$

Der Durchmesser s' nimmt also linear mit der Gegenstandsweite a ab. Setzt man Gleichung (5.30) in Gleichung (5.28) ein, so gilt:

$$P_p = P_1 \frac{I_0 \cos(\eta) l_p^2}{f'^2} \quad \left| \quad F - df = f' . \quad (5.31)$$

Diese Einstellung hat den großen Vorteil, dass P_p unabhängig von D , s' und sogar a ist. Lediglich die Objekteigenschaften und die Brennweite haben Einfluss auf die Pixelleistung.

Der Detektor CMOS 1421 ist laut Datenblatt¹² im Modus „high gain“ bei 9 nJ/cm^2 gesättigt. Dem entspricht die Bestrahlung eines Pixels mit der Fläche von $l_p^2 = (7 \mu\text{m})^2$ während der minimalen Belichtungszeit von $24 \mu\text{s}$ mit der optischen Leistung $P_p = 0,18 \text{ nW}$. Eingesetzt in Gleichung (5.31) folgt mit $I_0 = 0,26 \text{ sr}^{-1}$ (vgl. Anhang A.4) und $\eta = 0$: $P_p = 8,8 \text{ mW}$. Diese Leistung ist zu hoch, um augensicher zu sein (siehe Anhang C), zumal die Transmissionsgrade der optischen Bauteile wie auch die Quanteneffizienz des Detektors nicht eingerechnet sind. Es bleibt noch die Option, durch weitere optische Bauteile wie z. B. durch Mikrolinsen oder eine Zylinderlinse direkt über dem Detektor die wirksame Pixelfläche zu vergrößern.

Alternativ lässt sich in Gleichung (5.28) durch Fokussierung der Bildpunktdurchmesser s' minimieren, um den Detektor gut auszusteuern. Da auf diese Weise s' sehr klein werden kann, wird erheblich weniger Laserleistung benötigt und die Augensicherheit kann gewährleistet werden. Dabei muss sichergestellt sein, dass auch achsferne Strahlen scharf abgebildet werden können. Der Bildpunktdurchmesser auf dem Detektor s' muss unabhängig vom Einfallswinkel sein.

Linse

Nach Experimenten mit sphärischen und asphärischen Einzellinsen und Achromaten¹³ erwiesen sich insbesondere die Abbildungsfehler Bildfeldwölbung, Koma, Astigmatismus

¹²www.fairchildimaging.com/download/cmos1421-data-sheet-to-rev-d-8-17-09.pdf

¹³Zweilinsensystem, welches den Farbfehler (chromatische Aberration) weitgehend korrigiert

Tabelle 5.5: Anforderungen Sammeloptik

Brennweite	25 mm
Bildwinkel	30°
große Apertur (große Schärfentiefe)	siehe Fokussiereinrichtung
geringe Abmessungen korrigierte Abbildungsfehler	Öffnungsfehler, Koma, Astigmatismus, Bildfeldwölbung

und Öffnungsfehler als Problem: Der Öffnungsfehler tritt bei allen sphärischen Linsen auf und nimmt mit wachsender Apertur zu. Er führt dazu, dass bei achsparallel einfallenden Strahlen kein scharfer Punkt mehr abgebildet werden kann. Koma bewirkt ähnliches bei schief einfallenden Strahlen. Astigmatismus bedeutet, dass es bei schief einfallenden Strahlen keine eindeutige Fokusslage mehr gibt. Bei Bildfeldwölbung wird eine Ebene auf eine gewölbte Fläche abgebildet. Durch die Wölbung kann ebenfalls keine eindeutige Fokusslage für den gesamten Bildwinkel gefunden werden. Diese Fehler führen letztlich zu einer deutlichen Verzerrung achsferner Bildpunkte auf dem Detektor. Dadurch wird die belichtete Fläche vergrößert und die empfangene Leistung pro Pixel vermindert. Die Linse soll also so ausgelegt sein, dass die genannten Abbildungsfehler weitgehend korrigiert sind.

Durch eine große Apertur soll sichergestellt werden, dass der Detektor gut ausgeleuchtet wird. Dies widerspricht der Forderung nach einer großen Schärfentiefe. Die scharfe Abbildung eines beliebigen Punktes innerhalb des Messbereichs soll durch eine Fokussiereinrichtung erreicht werden (vgl. Abschnitt 5.2.10). Tabelle 5.5 fasst die Anforderungen an die Linse zusammen.

Als einfachste Variante eines fotografischen Objektivs reduziert ein Dreilinsensystem (Triplet) die genannten Abbildungsfehler weitgehend [38]. Durch Simulationen konnte die Eignung bestätigt werden. Auf dem Markt war keine Linse erhältlich, welche die genannten Anforderungen erfüllt. Daher wurde die Auslegung eines Triplets nach Vorgabe und die Fertigung der Linsen in Auftrag gegeben. Die Fassung der Linsen ist eine Eigenentwicklung. Abbildung 5.10 zeigt einen Schnitt durch das Objektiv mit der Blendenzahl $N = 2,8$ und Brennweite $f' = 25$ mm mit den wichtigsten Maßen (Eintrittspupille, Brennweite und Lage des Brennpunktes). Weitere technische Daten sind im Anhang A.5 in Tabelle A.1 aufgelistet.

Filter

Da das Messlicht durch einen schmalbandigen Laser erzeugt wird, liegt es nahe, vor der Empfangslinse einen optischen Bandpassfilter zu montieren, um Störlicht mit anderen

5 Entwicklung des VR-SCAN

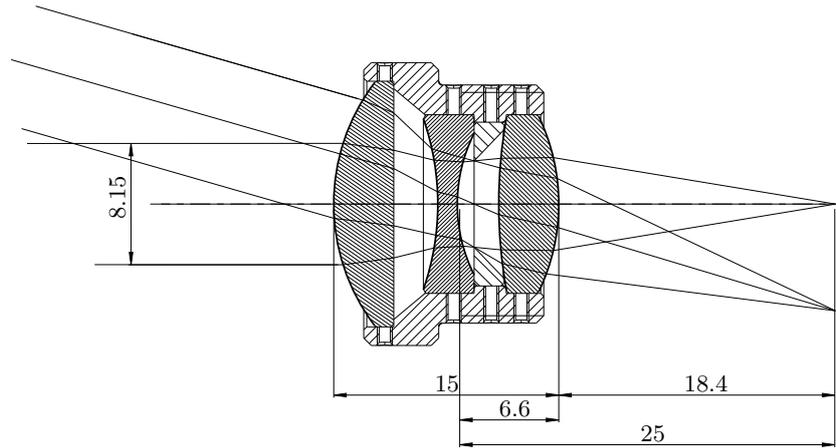


Abbildung 5.10: Objektiv VR-SCAN 1:2.8/25

Wellenlängen auszufiltern. Auf diese Weise wird der Rauschabstand des Messsignals erhöht. Bandpassfilter für gängige Laserwellenlängen sind im Handel verfügbar.

5.2.9 Projektor

Der Projektor erzeugt das Messlicht, formt es zu einem Strahl, der – abgelenkt vom MEMS Spiegel – die Szene abscannt. Er besteht aus einer Lichtquelle, einem Kollimator und einer Ansteuerung zur Leistungsmodulation und Sicherheitsüberwachung.

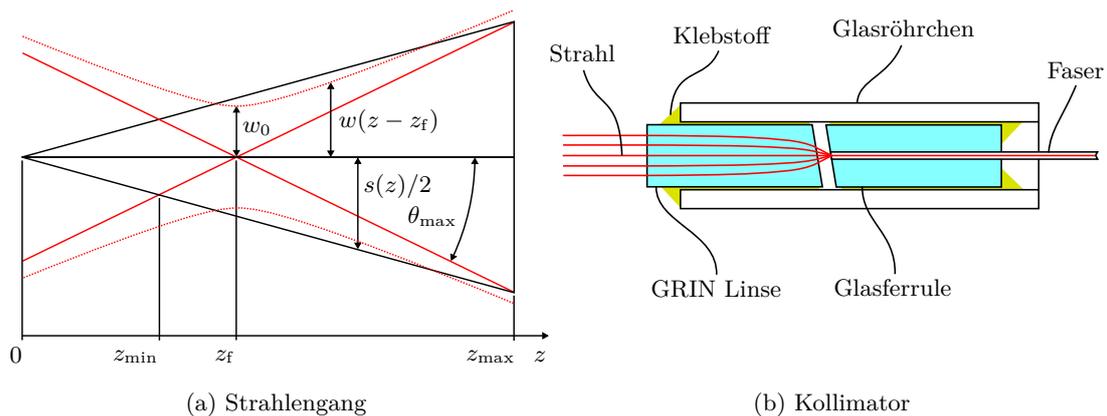


Abbildung 5.11: Projektor

Strahlengang

Gleichung (5.3) formuliert die Anforderung an den Durchmesser des projizierten Messpunktes $s(z)$. Den Strahlengang des Projektors gemäß dieser Bedingung zeigt Abbildung 5.11a: Der maximal zulässige halbe Divergenzwinkel θ_{\max} des Messstrahles entsteht, wenn der Strahl mit Ursprung in $z = 0$ auf $z = z_f$ fokussiert wird (dargestellt durch rote Geraden). Für die Fokussierentfernung z_f gilt

$$z_f = \frac{2 z_{\max} z_{\min}}{z_{\max} + z_{\min}} \quad (5.32)$$

mit $z_{\max, \min}$ als die maximale respektive minimale Messentfernung. Werden hierfür die in den Anforderungen spezifizierten 250 mm und 1000 mm eingesetzt, ergibt sich z_f zu 400 mm. Folglich gilt für den maximalen Divergenzwinkel

$$\theta_{\max} = \frac{s(z_{\max})}{2(z_{\max} - z_f)}, \quad (5.33)$$

was mit eingesetzten Zahlenwerten $\theta_{\max} = 0,83 \text{ mrad}$ ergibt.

In der Realität kann für den Projektor diese strahlenoptische Geometrie nicht angewendet werden, da aufgrund der Wellencharakteristik von Licht nicht auf beliebig kleine Strahldurchmesser fokussiert werden kann. Für Laser dient der Gauß-Strahl als gute Beschreibung (vgl. hierzu Anhang A.3): Das Strahlprofil folgt einer Gauß-Kurve und divergiert symmetrisch zur Strahltaile. Die Divergenz ist stets positiv und größer Null. In Abbildung 5.11 ist die Begrenzung eines gaußschen Strahlprofils skizziert mit Lage der Strahltaile in $z = z_f$. Der Radius des Strahles $w(z)$, an dem die Intensität auf $1/e^2$ gefallen ist, wird durch Gleichung (A.10) beschrieben. Setzt man die Divergenz des Fernfeldes gleich $\theta = \theta_{\max} = 0,83 \text{ mrad}$, so gilt nach Gleichung (A.12) mit $\lambda = 650 \text{ nm}$ (sichtbar rot) für den Radius an der Strahltaile: $w_0 = 0,25 \text{ mm}$. Nach Gleichung (5.3) soll der Radius bei $z = 400 \text{ mm}$ jedoch lediglich $0,2 \text{ mm}$ betragen. Im Fernfeld bei $z = 1000 \text{ mm}$ misst der Punktradius in dieser Auslegung bestenfalls $0,56 \text{ mm}$. Die Bedingung ist folglich nicht erfüllbar, jedoch kommt ein gut kollimierter Laserstrahl dem Konstruktionsziel recht nahe.

Ferner muss beachtet werden, dass der Strahldurchmesser bei $z = 0 \text{ mm}$ nicht die Apertur des MEMS Spiegels überschreitet. Diese beträgt laut Tabelle 5.2 für Typ *DM1D* unter Berücksichtigung von 45° Lichteinfallswinkel $1,5/\sqrt{2} \text{ mm} = 1,06 \text{ mm}$. Der Gauß-Strahl hat bei $z = 0 \text{ mm}$ einen Durchmesser von $2 \cdot 0,42 \text{ mm} = 0,84 \text{ mm}$. Diese Randbedingung wird knapp erfüllt, aber auch hierdurch wird deutlich, dass auf bestmögliche Strahlqualität geachtet werden muss.

Lichtquelle

Berücksichtigt man die Baugröße, so bietet eine Laserdiode, die ihr Licht in eine Monomodefaser (Single-Mode Faser) einkoppelt, die bestmögliche Strahlqualität pro Bauraum:

5 Entwicklung des VR-SCAN

Das Laserlicht hat beim Austritt aus der Faser einen perfekt kreisförmigen Querschnitt mit gaußscher Intensitätsverteilung. Der Austrittsquerschnitt ist zudem bei einer Monomodefaser sehr klein ($\approx 7 \mu\text{m}$), wodurch kollimierte Strahlbündel mit geringem Durchmesser möglich werden. Die direkte Kollimierung des Strahls einer Laserdiode, wie es in Laserpointern üblich ist, ist ebenfalls platzsparend, allerdings müssen hier Einbußen bei der Strahlqualität hingenommen werden.

Die benötigte Leistung des Projektors hängt von vielen Faktoren ab: Die Reflexionsgrad des Objektes, sowie dessen Beobachtungswinkel bestimmt die Strahlungsintensität des reflektierten Lichts. Die Apertur der Sammellinse begrenzt die Menge des empfangenen Lichts, welches auf den Bildpunkt auf dem Detektor fokussiert wird. Durch eine Reihe von Annahmen, untermauert von Messungen, lässt sich die nötige Leistung des Projektors abschätzen. Dabei wird von ungünstigen Bedingungen ausgegangen:

- Die Reflexionseigenschaft von grauem Papier soll als Referenz für das Messobjekt dienen. Die Reflexion des Messlichts folgt daher näherungsweise dem Lambertschen Gesetz. Durch Messungen wurde die normierte Strahlungsintensität in Normalenrichtung zu $I_0 = 0,26 \text{ sr}^{-1}$ bestimmt (vgl. Anhang A.4).
- Der vom Laser projizierte Punkt wird von der Linse unter $\eta = \alpha_{\text{max}} = 20^\circ$ (maximaler Scanwinkel) beobachtet. Der Empfangsraumwinkel Ω beträgt bei 8 mm Apertur der Linse nach Gleichung (5.27) $\Omega = 5 \cdot 10^{-5} \text{ sr}$ in 1000 mm Entfernung. Die durch die Linse fallende Lichtleistung $I_d \cdot \Omega$ wird auf die Detektorebene als Punkt mit dem Durchmesser s' abgebildet.
- Der Detektor CMOS 1421 ist laut Datenblatt nach Bestrahlung während der minimalen Belichtungszeit von 24 μs mit der optischen Leistung $P_p = 0,18 \text{ nW}$ gesättigt.

Nach Gleichung (5.28) ist die erforderliche Laserleistung P_l proportional zum Quadrat des Bildpunktdurchmessers s' . Aufgelöst nach P_l ergibt sich für $s' = 10 \text{ Pixel}$ (0,07 mm) die Laserleistung $P_l = 1,16 \text{ mW}$.

Mit dieser überschlägigen Rechnung kann nur die Größenordnung der benötigten Laserleistung abgeschätzt werden, da insbesondere der Reflexionsgrad der zu messenden Oberfläche stark variiert.

Es wurde schließlich eine fasergekoppelte Laserdiode mit 17,5 mW Leistung aus der Monomodefaser bei 658 nm ausgewählt (Blue Sky FiberMax FMXL658¹⁴). Die Leistung bietet genügend Reserven und das Gehäuse ist zudem das kleinste auf dem Markt. Im Gehäuse ist eine Monitordiode integriert, welche ein Signal proportional zur aktuell emittierten Lichtleistung liefert. Dadurch wird eine Leistungsregelung ermöglicht (s. Abschnitt Leistungsregelung).

¹⁴www.blueskyresearch.com

Kollimation

Der Projektor besteht aus einer fasergekoppelten Laserdiode, welche auf kleinem Raum bestmöglich kollimiert werden soll. Abbildung 5.11b zeigt die optische Auslegung: Das Faserende, das in eine Glasferrule eingeklebt ist, wird zusammen mit einer zylinderförmigen GRIN¹⁵ Linse in ein Kollimatorröhrchen aus Glas eingeklebt. Die Linse erzeugt aufgrund ihres Brechzahlprofils einen kontinuierlich gebrochenen Strahlverlauf. Solange der unter UV-Licht aushärtene Klebstoff noch flüssig ist, kann die Linse fokussiert und damit der Strahl parallel gerichtet werden. Die GRIN Linse hat eine sehr kurze Brennweite (0,23 Pitch¹⁶). Die numerische Apertur ist folglich groß genug für das aus dem Faserende stark divergent austretende Licht.

Weitere Vorteile dieser Lösung neben der guten Strahlqualität sind die extrem kleinen Abmessungen des Kollimators aufgrund räumlicher Abtrennung der Lichtquelle durch die Glasfaser, sowie einfacher Aufbau und Justierung. Die Strahlquelle ist außerdem vom Kollimator über Stecklösungen entkoppelbar, was sie für Experimente einfach austauschbar macht. Weiterhin sind so auch Superlumineszenzdioden (SLD) einsetzbar, um den Einfluss von Laserspeckles¹⁷ auf das Messergebnis zu untersuchen (vgl. Abschnitt 6.3): SLD sind aufgrund der notwendigen Temperaturstabilisierung fast ausschließlich fasergekoppelt erhältlich. Aus diesem Grund haben sowohl die Ferrule als auch die Linse eine um 8° geneigte Stirnfläche, um Reflexionen an den Grenzflächen zurück in die Faser zu minimieren. Rückreflexionen können zu Instabilität oder gar Zerstörung der SLD führen.

Leistungsregelung

Gleichung (5.28) bringt die Laserleistung P_l mit der pro Pixel empfangenen Leistung P_p in Zusammenhang. Ziel ist, die Signalstärke S pro Pixel konstant hoch zu regeln, um gute Konfidenzwerte der Messungen zu erhalten (vgl. Abschnitt 5.1.2). Die Laserleistung muss also für jeden Messpunkt so moduliert werden, dass P_p konstant bleibt.

Beim Scannen eines beliebigen Objektes unterliegen die Größen s' , η und I_0 großen unvorhersehbaren Schwankungen, je nach Entfernung, Neigung und Reflexionsgrad (Farbe, Textur) des Objektes. Folglich muss das Verhältnis von ausgesendeter und empfangener Leistung P_l/P_p einen großen Dynamikbereich abdecken. Der Laserleistungsregler muss mit dem Messtakt des VR-SCAN schritthalten, also gleich der Bildwiederholrate des Detektors (≈ 40 kHz) sein.

Die Leistungsregelung besteht aus drei kaskadierten Regelkreisen:

¹⁵Gradienten-Index: radial abnehmender Brechungsindex

¹⁶Der „Pitch“ einer GRIN Linse ist der Bruchteil einer vollen Sinusperiode, die die Strahlen innerhalb der Linse zurücklegen. So bedeutet 0,25 Pitch, dass eine Punktlichtquelle an der Eintrittsfläche der Linse zu einem parallelen Lichtbündel am Austritt kollimiert wird.

¹⁷Bildrauschen aufgrund Interferenzen durch Reflexion an rauen Oberflächen. Die Rauigkeit liegt dabei in der Größenordnung der Laserwellenlänge.

5 Entwicklung des VR-SCAN

- Der innere Regelkreis ist der Stromregler der Laserdiode. Er wird aufgrund der sehr steilen Strom-Spannungs-Kennlinie einer Laserdiode benötigt und ist in einer elektronischen Schaltung realisiert.
- Der mittlere Regler stellt die optische Ausgangsleistung P_1 . Regelgröße ist der Monitordiodenstrom I_{mon} . Es gilt näherungsweise $I_{\text{mon}} \sim P_1$.
- Der äußere Regler sorgt für konstante Signalstärke S am Detektor. Es gilt $S \sim P_D$. Stellgröße ist die Ausgangsleistung P_1 . Damit der Regler effektiv arbeiten kann, liegt der Sollwert unter der Sättigungsgrenze von S . Sollte S dennoch gesättigt sein, so wird P_1 durch einen festen Faktor reduziert, bis der Regelbereich wieder erreicht ist.

Die beiden äußeren Regler sind als PI-Regler in einem FPGA implementiert. Der I-Anteil sorgt jeweils dafür, dass keine bleibende Regelabweichung auftritt. In [15] ist die Umsetzung des Konzeptes detailliert beschrieben.

Sicherheitsüberwachung

Die Laserleistungsregelung muss aus zwei Gründen überwacht werden: Erstens muss die Augensicherheit gemäß DIN 60825-1 [32] gewährleistet sein, weswegen die tatsächlich ausgesendete Leistung gemessen und begrenzt oder ggf. abgeschaltet werden muss. Da der VR-SCAN als Laser mit richtungsveränderlicher Strahlung klassifiziert ist (vgl. Anhang C), muss der Betrieb des MEMS Scannerspiegels ebenfalls überwacht werden. Zweitens soll die Zerstörung des Lasers durch Überstrom oder zu hohe optische Leistung vermieden werden. Daher wird die Einhaltung der Maximalwerte nach Datenblatt ebenfalls sichergestellt.

Nach den Berechnungen in Anhang C ist der VR-SCAN ein Laser der Klasse 2 und damit augensicher, falls die Laserleistung P_1 nicht größer als 1,8 mW wird. Voraussetzung ist, dass der Laser in den Umkehrpunkten der sinusförmigen Schwingung, in denen er zum Stillstand kommt, abgeschaltet wird. Dieser Bereich liegt zwischen $\alpha = 0,35$ rad und der Schwingungsamplitude von $A = 0,4$ rad.

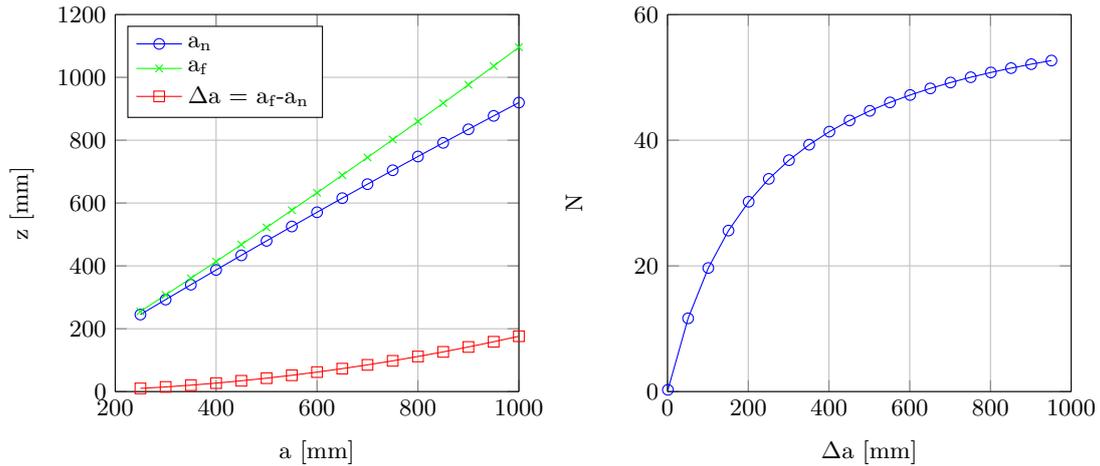
Es wurde ein Zustandsautomat in einem FPGA implementiert, der diese Aufgaben übernimmt [15].

5.2.10 Fokussiereinrichtung

Eine durchgängig scharfe Abbildung ist bei dem geforderten Messfeld mit großer Tiefe nicht möglich. Die Schärfentiefe ist als der Bereich Δa im Objektraum zwischen minimaler und maximaler Gegenstandsweite definiert, der scharf abgebildet werden kann. Zur Berechnung der Schärfentiefe wird ein maximal zulässiger Unschärfekreisdurchmesser u' im Bildraum definiert, bis zu welchem das Bild als scharf gilt. Nach Naumann/Schröder

[71] gilt für das Bildformat 13x17 (welches in der Größe vergleichbar ist mit dem verwendeten CMOS Zeilensensor) $u' = 20 \mu\text{m}$. Dies entspricht bei einer Pixellänge von $7 \mu\text{m}$ knapp 3 Pixeln.

Die Schärfentiefe berechnet sich wie im Anhang A.2 beschrieben. Abbildung 5.12a zeigt den Verlauf der Schärfentiefe mit Werten der endgültigen Version des VR-SCAN. Ohne Abblendung des VR-SCAN-Objektives (Blende 2,8) ergibt sich der abgebildete Schärfentiefeverlauf: Wird z. B. auf 600 mm Entfernung fokussiert, beträgt die Schärfentiefe dort lediglich 62 mm.



(a) Schärfentiefeverlauf mit Brennweite $f' = 25 \text{ mm}$, Durchmesser des Unschärfekreises $u' = 20 \mu\text{m}$, Blendenzahl $N = 2.8$

(b) Blendenzahl N (mit Brennweite $f' = 25 \text{ mm}$, Durchmesser des Unschärfekreises $u' = 20 \mu\text{m}$, Gegenstandsweite im Nahbereich $a_n = 250 \text{ mm}$) über der Schärfentiefe Δa

Abbildung 5.12: Schärfentiefe und Blendenzahl

Durch abblenden (größere Blendenzahl N) kann die Schärfentiefe vergrößert werden. Abbildung 5.12b stellt den Verlauf der notwendigen Blendenzahl N für eine gewünschte Schärfentiefe Δa nach Gleichung (A.9) dar. Außer von Δa , ist N auch vom Nahpunkt a_n abhängig, ab welchem der Schärfebereich beginnt. Um die gesamte Messtiefe des VR-SCAN scharf abzubilden ($\Delta a = 750 \text{ mm}$ und $a_n = 250 \text{ mm}$), muss demnach sehr stark auf $N = 50$ abgeblendet werden. Dieser Wert ist rein theoretisch und nicht praktikabel, nicht zuletzt aufgrund der zu erwartenden deutlichen Beugungseffekte.

Da sowohl ausreichendes abblenden nicht durchführbar, als auch die Schärfentiefe bei offener Blende zu gering ist, muss der Fokus des VR-SCAN variabel sein. Durch einen Mikromotor soll die gesamte Linse verschoben werden. Der nötige Verstellweg von df ergibt sich aus dem Messbereich und der Abbildungsgleichung (A.1) zu 2,14 mm. Der ausgewählte Piezomotor *SQUIGGLE RV* ist laut Hersteller *New Scale Technologies* der

kleinste Linearmotor der Welt („the world’s smallest linear motor“).¹⁸ Zur Messung von df dient ein magnetischer Positionssensor (Tracker) mit $0,5 \mu\text{m}$ Auflösung.

Der Piezomotor wird von einem dedizierten ASIC angesteuert und benötigt keine weitere Leistungselektronik.¹⁹ Durch Aneinanderreihung von Impulsfolgen (Bursts) kann der Motor ähnlich wie ein Schrittmotor betrieben werden. Ein Burst entspricht einem minimalen Schritt. Die Positionsregelung wird in einem FPGA als ein P-Regler realisiert, mit der Anzahl der Bursts als Stellgröße und der Position des Trackers als Regelgröße. Die vom Tracker gemessene Position ist nur innerhalb eines Magnet-Polpaares absolut, daher muss nach Einschalten eine Referenzfahrt durchgeführt werden.

Die Fokussierung der Linse kann nicht mit dem Messtakt schritthalten. Während der Messung sollte der Fokus außerdem nicht bewegt werden, damit die Messgenauigkeit nicht leidet. Je nach Anwendung müssen daher unterschiedliche Autofokus Strategien verfolgt werden:

- *Hochgenaue Messung:* Nachdem der Sensor in Messabstand gebracht worden ist, wird einmalig möglichst exakt fokussiert und dadurch die bestmögliche Signalstärke am Detektor erreicht. Die erforderliche Fokusposition df wird nach der Abbildungsgleichung (A.1) ermittelt.
- *Hohe Messtiefe:* Der Fokus wird in groben Stufen nach überlappenden Entfernungsbereichen eingestellt. So ist in jeder Entfernung innerhalb des Messbereichs eine Messung möglich, wenn auch nicht in bestmöglicher Präzision. Dies ist besonders bei der Exploration nützlich.

5.2.11 Bildprozessierung

Das auf dem diskreten Detektor entstehende Bild P' des Messpunktes P muss im Gegensatz zur Positionsmessung auf einem kontinuierlichen PSD numerisch ausgewertet werden. Das Bild des Messpunktes erzeugt einen einzelnen Intensitätsberg, genannt „Peak“²⁰. Ziel ist es, die Position p dieses Peaks zu ermitteln. Die Prozessierung des Peaks hat darüber hinaus die Aufgabe, evtl. auftretende weitere Peaks durch Fehlreflexionen oder Umgebungslicht (Sonnenlicht) auszufiltern.

Nach den Anforderungen in Tabelle 5.1 soll der Messfehler im Fernbereich 1 mm betragen. Die erforderliche Präzision Δp beträgt folglich nach Gleichung (3.4) $1,5 \mu\text{m}$, oder – bei $7 \mu\text{m}$ Pixelgröße – 0,2 Pixel. Im Nahbereich ist die Anforderung aufgrund des quadratischen Gewichtes der Entfernung etwas geringer (0,3 Pixel). Die Peak Prozessierung muss also auf weniger als ein Pixel genau (Subpixel-genau) sein, weshalb simple Maximalwertauswertung ausscheidet.

¹⁸www.newscaletech.com

¹⁹Motoransteuerungs-ASIC und *Tracker* Positionssensor von Austria Microsystems (www.ams.com)

²⁰Peak = Spitze

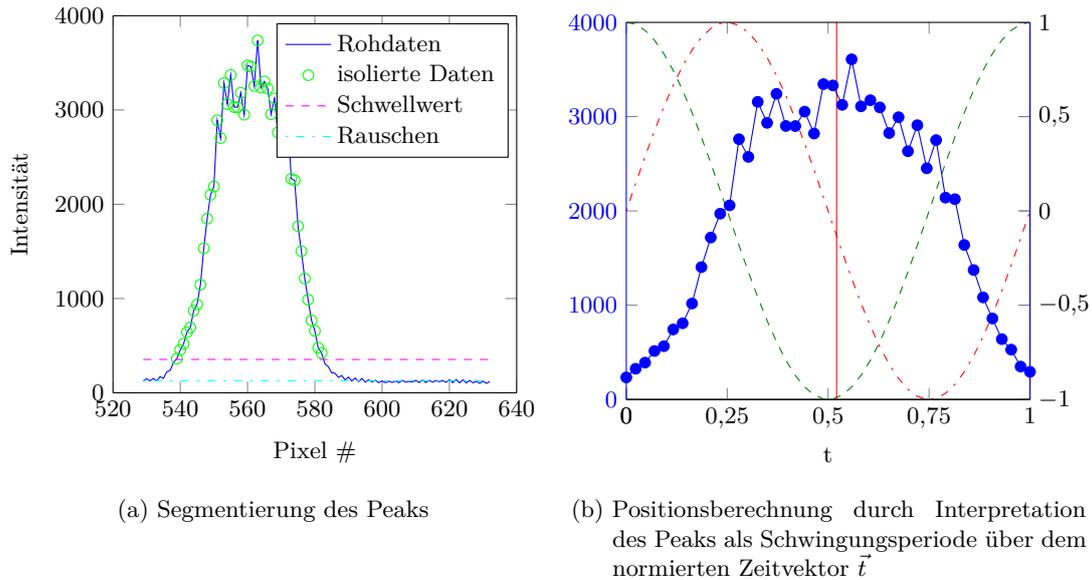


Abbildung 5.13: Prozessierung des Messpunktbildes (Peak) auf dem Detektor

In der Literatur gibt es viele Ansätze [18, 37, 39]. Aufgrund des großen Messbereichs, der unterschiedlich scharfen Abbildung, sowie Laser Speckle (Abbildung 6.4), entstehen hier jedoch im Unterschied zu den meisten Anwendungen stark unterschiedliche Peakformen und -breiten. Besonderer Wert muss daher auf Robustheit und Präzision bei ähnlichen Peakformen gelegt werden, daher muss die gesamte, charakteristische Peakform in die Berechnung mit einfließen. Abbildung 5.13a zeigt einen für den VR-SCAN typischen Peak. Es ist offensichtlich, dass es nicht ausreicht, nur die unmittelbare Umgebung des Maximums auszuwerten. Durch Speckle ist das Maximum verrauscht, außerdem ist der Peak recht breit.

In [97] wurden zahlreiche Algorithmen getestet und bewertet. Letztendlich erwies sich ein anderer Ansatz als am effektivsten. Der verwendete Algorithmus interpretiert den freigestellten Peak als eine Periode einer Schwingung und ermittelt deren Phasenversatz mittels der Fourier-Deskriptoren der Grundschwingung. Dieser Ansatz geht zurück auf K. Arbter, der ebene Kurven mittels Fourier-Deskriptoren beschrieb [6].

Abbildung 5.13 verdeutlicht den Algorithmus: Der Peak wird freigestellt, indem, ausgehend vom globalen Maximum, die Punkte beider Flanken ausgewählt werden, die über einem Schwellwert liegen. Der Betrag des Schwellwert ist das zuvor ermittelte Rauschniveau des Umgebungslichtes multipliziert mit einem festen Faktor (vgl. Abbildung 5.13a).

5 Entwicklung des VR-SCAN

Aus dem freigestellten Peak wird ein Vektor \vec{p} mit der variablen Länge N (Peakbreite) gebildet. Sei I_n die Intensität des n -ten Pixels, dann ist

$$\vec{p} = [I_1, I_2, \dots, I_N]^\top .$$

Mit $T = N - 1$ als die Periodenlänge ist der normierte Zeitvektor \vec{t} der ersten Harmonischen definiert als:

$$\vec{t} = [0, 1, \dots, T]^\top \cdot 1/T .$$

Es werden nun die Sinus- und Kosinuswellen der ersten Harmonischen gebildet:

$$\begin{aligned} \vec{c} &= [c_1, c_2, \dots, c_N]^\top \text{ mit } c_n = \cos(2\pi t_n) , \\ \vec{s} &= [s_1, s_2, \dots, s_N]^\top \text{ mit } s_n = \sin(2\pi t_n) . \end{aligned}$$

Führt man nun eine Vektormultiplikation dieser mit dem Peakvektor \vec{p} durch, kann anschließend über den Arcustangens 2 der Phasenwinkel berechnet werden:

$$\begin{aligned} X &= \vec{c} \cdot \vec{p}^\top , \\ Y &= \vec{s} \cdot \vec{p}^\top , \\ \xi' &= \arctan2(Y, X) . \end{aligned}$$

Die Subpixel-genaue Verschiebung ξ des Peaks relativ zum Beginn der linken Flanke wird wie folgt ermittelt:

$$\xi = \begin{cases} \xi' \frac{T}{2\pi} & \text{für } \xi' \geq 0 \\ \xi' \frac{T}{2\pi} + T & \text{für } \xi' < 0 \end{cases} . \quad (5.34)$$

Der freigestellte Peak über dem Zeitvektor, die Sinus- und Kosinuswelle, und schließlich die Peakposition ξ sind in Abbildung 5.13b dargestellt.

5.2.12 Konfidenzbewertung der Messwerte

Nach der Robustheit-Hypothese aus Abschnitt 2.3.1 müssen für jeden Messpunkt die Konfidenzwerte K_M und K_{frei} für Freiraummessungen ermittelt werden. Für K_M muss nach Gleichung (2.2) lediglich der Rauschabstand a_R berechnet werden.

Die Berechnung von K_{frei} nach Gleichung (2.3) gestaltet sich dagegen komplexer: Der Faktor C_{dist} soll die ausgesendete Laserleistung P_l ins Verhältnis zur theoretisch empfangbaren Leistung pro Pixel P_p setzen. Nach Gleichung (5.28) ist P_p proportional zur Laserleistung P_l , und umgekehrt proportional zum Quadrat der Gegenstandsweite a und zum Quadrat des Bildpunktdurchmessers s' .

Maximal wird die empfangbare Leistung also bei minimalem a und s' , sowie maximalem P_l . Wird unter diesen Bedingungen trotzdem nichts empfangen, so muss die nach dem

Lambertschen Gesetz (vgl. Anhang A.4) reflektierte Strahlungsintensität I_0 gegen Null, oder der Reflexionswinkel η gegen $\pi/2$ gehen. Dies wird erreicht, indem das Objekt sehr schlecht reflektiert oder nahezu tangential zur Oberfläche bestrahlt wird – oder indem sich gar kein Objekt in der Einstellentfernung a befindet und der gemessene Punkt frei ist. Diese Möglichkeit ist für den Extremfall am wahrscheinlichsten, hier soll dann die Freiraumkonfidenz mit $K_{\text{frei}} = 1$ maximal sein.

Gleichung (2.3) wird folglich mit der Vereinfachung $a = z$ zu

$$K_{\text{frei}}(z, s') = P_1/P_{1,\text{max}} \cdot C \frac{1}{s'^2 z^2} \quad \left| \quad a_{\text{R}} < a_{\text{R},\text{min}} \right. \quad (5.35)$$

mit dem konstanten Normierungsfaktor C erweitert.

Der Bildpunktdurchmesser s' setzt sich aus der optischen Abbildung des Laserpunktes mit Durchmesser s und der Unschärfe durch Defokussierung zusammen:

$$s' = s'_{\text{opt}} + s'_{\text{defok}} \cdot \quad (5.36)$$

Mit der Abbildungsgleichung (A.1) und dem Abbildungsmaßstab (A.2) gilt mit der Vereinfachung $a = z$

$$s'_{\text{opt}} = \left| \frac{f'}{z - f'} \cdot s \right|. \quad (5.37)$$

Der Anteil der Unschärfe berechnet sich aus der Apertur D , der Bildweite a' und dem Abstand zwischen Linse und Detektor $F - df$ ($df = \text{Fokusposition}$) zu

$$s'_{\text{defok}} = \left| \frac{D}{a'} (F - df - a') \right|. \quad (5.38)$$

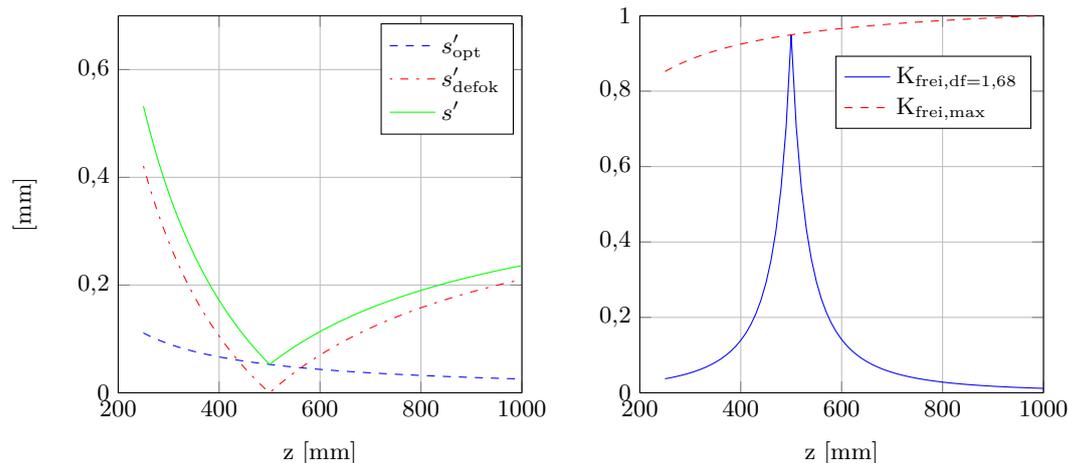
Mit der Abbildungsgleichung (A.1) kann a' eliminiert werden und es gilt wiederum mit der Vereinfachung $a = z$

$$s'_{\text{defok}} = \left| \frac{D}{f'z} ((F - df)(f' - z) + f'z) \right|. \quad (5.39)$$

Abbildung 5.14a zeigt den Verlauf des Bildpunktdurchmessers s' nach Gleichung (5.36) mit den beiden Anteilen aus optischer Abbildung s'_{opt} und Defokussierung s'_{defok} (Gleichungen (5.37), (5.39)). Die abgebildete Kurve s'_{defok} gilt für die Fokussierung auf $z = 500 \text{ mm}$ und hat somit dort, wie auch s' , ihr Minimum. Der Fokus wird über df eingestellt.

Der resultierende Konfidenzwert K_{frei} wird in Abbildung 5.14b gezeigt: Mit Fokus auf $z = 500 \text{ mm}$ ($df = 1,68 \text{ mm}$) hat die Kurve, wie erwartet, eine ausgeprägte Spitze. Zeichnet man den Verlauf des maximalen Konfidenzwertes, so fällt auf, dass dieser mit zunehmender Entfernung steigt. Dieses vermeintlich paradoxe Verhalten erklärt sich durch das überproportionale Abnehmen des Bildpunktdurchmessers s' im Vergleich zur Zunahme von z , so dass der Nenner in (5.35) mit steigendem Abstand kleiner wird. In der Realität

5 Entwicklung des VR-SCAN



(a) Bildpunktdurchmesser s' mit Fokus auf $z = 500$ mm

(b) Konfidenzwert K_{frei}

Abbildung 5.14: Berechnung des Konfidenzwertes der Freiraummessung K_{frei}

ist s' freilich nach unten begrenzt: Das Auflösungsvermögen der Linse ist endlich, und die Pixel sind nicht beliebig klein. Der Zusammenhang (5.28), auf den Gleichung (5.35) aufbaut, stellt dahingehend eine Idealisierung dar.

In der Praxis würde der gesamte Messbereich mit maximaler Konfidenz $K_{\text{frei, max}}$ auf Hindernisfreiheit abgetastet werden, indem beginnend im Nahbereich bis zur maximalen Messentfernung „durchfokussiert“ wird. Durch die stufenlose Verstellbarkeit der Fokuspersion df wird dies möglich (siehe Abschnitt 5.2.10).

Der Normierungsfaktor C soll so berechnet sein, dass K_{frei} maximal 1 wird. Konkret hängt C also vom kleinstmöglichen Nenner in Gleichung (5.35) ab: Dieser wird bei $z = 1000$ mm erreicht mit $s'_{\text{defok}} = 0$ mm. Nach (5.37) wird mit $f' = 25$ mm und $s = 1$ mm der minimale Bildpunktdurchmesser $s'_{\text{opt}}(z = 1000) = 25,6 \mu\text{m}$. Folglich beträgt dann C theoretisch $s'_{\text{opt}} z^2 = (25,6 \mu\text{m})^2 (1000 \text{ mm})^2 = 655 \text{ mm}^4$.

5.2.13 Systemdesign

Parallele Prozessierung im Sensor in einem *FPGA* reduziert die bei hohen Messraten anfallende Datenmenge erheblich und erlaubt eine einfache und schlanke Datenverbindung zum Rechner. Durch eine Implementierung in einem *FPGA* sind zudem kurze Latenzen in den Reglern für Sendeleistung, Fokus und MEMS Spiegel garantiert.

Abbildung 5.15 zeigt eine Übersicht über das Systemdesign des *VR-SCAN*. Das zentrale *FPGA* verbindet alle oben beschriebenen Komponenten und führt die relevanten Prozessierungen durch.

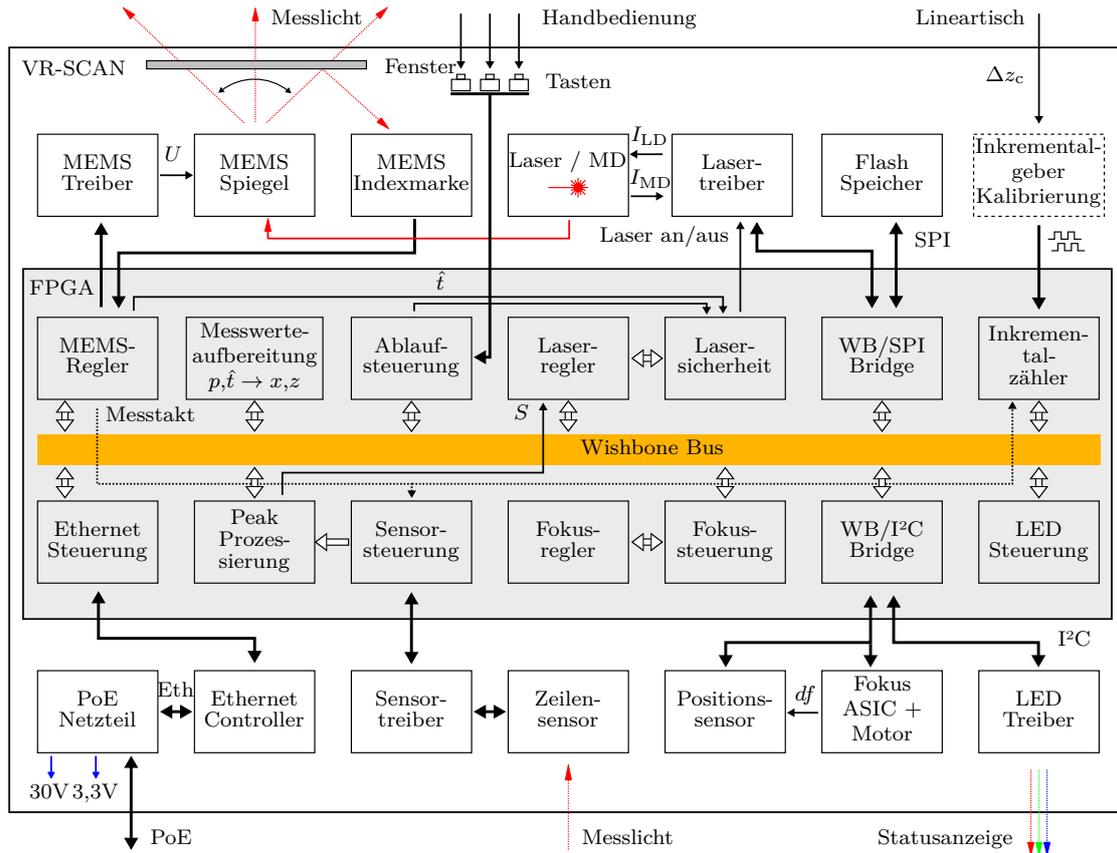


Abbildung 5.15: Systemdesign VR-SCAN

Innerhalb des FPGA ist eine Wishbone²¹ (WB) Architektur implementiert: Der Wishbone Bus bietet eine standardisierte Open Source Schnittstelle zwischen den einzelnen Blöcken. Durch den vereinheitlichten Datenaustausch kann die Implementierung der Blöcke durch mehrere Entwickler parallelisiert werden. Der Bus ist als Cross Bar Switch ausgeführt, wodurch zeitgleicher direkter Datenaustausch zwischen den Blöcken möglich wird. Wartezeiten beim Datenaustausch entstehen nur bei zeitgleichem Zugriff auf dieselbe Ressource. Zeitkritische oder sicherheitsrelevante Signale umgehen den Bus und werden direkt von Block zu Block übertragen.

Die außerhalb des FPGA in der Peripherie liegenden Blöcke symbolisieren Ansteuer- und Treiberplatinen oder sonstige Baugruppen. Die Schnittstellen dazu orientieren sich an den verwendeten Komponenten: Eingesetzt werden die seriellen Datenbusse I²C²² und SPI²³, für die jeweils Umsetzer (Bridges) auf den WB Bus implementiert werden. Die

²¹Wishbone B4 – Wishbone System-on-Chip (SoC) Interconnection Architecture for Portable IP Cores (<http://opencores.org/opencores,wishbone>)

²²Inter-Integrated Circuit

²³Serial Peripheral Interface

5 Entwicklung des VR-SCAN

übrigen Peripheriekomponenten sind proprietär angebunden. Die menschliche Bedienung erfolgt über drei beliebig konfigurierbare Tasten, eine verschiedenfarbige Statusanzeige erzeugt das Feedback.

Die notwendige Übertragungsrate der Datenverbindung nach außen berechnet sich nach dem maximalen Messtakt, welcher gleich der maximalen Zeilenrate des CMOS Zeilensensors ist: 38,2 kHz. Die Größe der Nutzdaten, also die Gesamtheit aus Messwerten ($x, z, \alpha, K_M, K_{\text{frei}}, t, \dots$) und Statuswerten (P_1, df, \dots) wird auf maximal 64 Byte festgelegt, was Raum für zusätzliche Daten zu Debug- oder Kalibrierzwecke lässt. Die Datenübertragungsrate muss also nach außen mindestens 19,6 MBit/s betragen. Die ausgewählte Technologie ist Ethernet. Im verwendeten Ethernet Controller²⁴ in der VR-SCAN-Hardware ist TCP/IP bereits integriert. Die Datenübertragungsrate beträgt maximal 50 MBit/s. Durch Verwendung von Power over Ethernet (PoE) dient die Datenverbindung zugleich als Stromversorgung und ist die einzige Kabelverbindung des VR-SCAN. Das PoE Netzteil trennt die Daten von der Versorgung und bildet die Spannungen 3,3 V und 30 V. Letztere dient im MEMS Treiber als Maximalwert der Spannung U der Spiegelansteuerung. Alle restlichen Komponenten werden mit 3,3 V versorgt, lediglich die stabilisierten Core-Spannungen des FPGA werden noch zusätzlich erzeugt.

Die einzelnen Blöcke werden nun detailliert beschrieben. Alle Blöcke werden im FPGA parallel abgearbeitet. Bevor die Messung beginnt, muss das System hochgefahren werden. In der Ablaufsteuerung ist ein Zustandsautomat implementiert, der die Hochfahrsequenz steuert:

1. Die Steuerungen von Fokus, Ethernet und Sensor initiieren die angeschlossene Hardware.
2. Die Fokussteuerung setzt die Position des Motors durch eine Referenzfahrt auf Null. Der Fokusregler liest über I²C, WB/I²C Bridge, WB Bus und die AF Steuerung die Linsenposition df aus dem AF Tracker aus. Die Regelabweichung wird berechnet und ggf. der Motor über den ASIC bewegt. Positionssensor und ASIC teilen sich einen I²C Bus.
3. Die individuellen Kalibrierparameter werden über WB und die WB/SPI Bridge aus dem Flash-Speicher in die Messwertaufbereitung geladen.
4. Der Laserregler schaltet über WB/SPI und den Lasertreiber die Laserdiode ein. Diese sendet Messlicht auf den stillstehenden MEMS Spiegel. Die Leistung liegt im ungefährlichen, augensicheren Bereich für stillstehende, kollimierte Laserstrahlung. Die Lasersicherheit ist abgeschaltet, sie würde aufgrund des noch stehenden MEMS Spiegels den Laser ansonsten ausschalten. Die Ablaufsteuerung greift dazu direkt auf die Lasersicherheit zu.
5. Der MEMS Spiegel wird durch eine mit hoher Frequenz startende Frequenzrampe angeschwungen (vgl. Resonanzkurve in Abbildung 5.5). Die Frequenz wird kontinuierlich so weit reduziert, bis die Schwingungsamplitude so groß ist, dass an

²⁴WIZnet W5300 (www.wiznet.co.kr)

der Indexmarke gültige Messwerte generiert werden. Der Spiegel schwingt nun im Regelbereich.

6. Der MEMS Regler wird eingeschaltet. Amplitude und Phase werden konstant geregelt.
7. Mit Erreichen der Sollwerte der MEMS Regelung wird die Lasersicherheit eingeschaltet. An den Umkehrpunkten der Schwingung, oder sobald die Spiegelschwingung stoppt, wird der Laser ausgeschaltet (vgl. Laserklassifizierung in Anhang C). Aus Sicherheitsgründen muss hier die Latenz minimiert werden, weshalb die notwendigen Signale nicht über den WB übertragen werden. Als Maß für den Spiegelwinkel steht der aktuelle normierte Zeitstempel der MEMS Schwingung \hat{t} daher über eine Direktverbindung zu Verfügung. Der Lasertreiber wird ebenfalls über eine direkte Leitung geschaltet.

Man kann über die Tasten oder über via Ethernet übertragene Kommandos Einfluss auf die Ablaufsteuerung nehmen. Der Status wird mit verschiedenfarbigen LED angezeigt. Hierzu wird via WB Bus die LED Steuerung und über die WB/I²C Bridge der LED Treiber angesteuert.

Unmittelbar nach dem Hochfahren beginnt die Messung. Innerhalb eines Messtaktes werden die Blöcke wie folgt durchlaufen:

1. Die geregelte, und dadurch variable MEMS Schwingungsperiode wird durch einen konstanten Faktor geteilt und daraus der Messtakt generiert. Der Messtakt synchronisiert als direkte Leitung alle Einzelmessungen: Die Belichtung des Zeilensensors, die Messwerteaufbereitung und bei aktiver Kalibrierung den Inkrementalzähler des Lineartisches²⁵.
2. Zeitgleich wird über den WB Bus der aktuelle normierte Zeitstempel der MEMS Schwingung \hat{t} als erstes Messergebnis an den Block Messwerteaufbereitung weitergegeben.
3. Die Sensor Steuerung liest nach einer festen Belichtungszeit die Zeile aus.
4. Die belichtete Zeile wird im Block Peak Prozessierung wie in Abschnitt 5.2.11 beschrieben verarbeitet. Das zweite Messergebnis p wird zusammen mit weiteren Nebenergebnissen über WB an die Messwerteaufbereitung gesendet.
5. Zeitgleich wird das direkt am Laserregler anliegende Signal S (maximale Intensität des Peaks) aktualisiert. Der Laserregler stellt daraufhin die Laserleistung so ein, dass die gewünschte Signalstärke S erreicht wird. Die Latenz des Reglers wird durch die direkte Verbindung minimiert.
6. Vom Lasersicherheitsblock wird die vom Regler gestellte Laserleistung geprüft und – falls augensicher – freigegeben. Ansonsten wird sie begrenzt.

²⁵verwendet zur Kalibrierung des VR-SCAN, vgl. Kapitel 6

5 Entwicklung des VR-SCAN

7. Die neue Soll-Laserleistung wird via WB und WB/SPI Bridge zum Lasertreiber übertragen, und dort in den Laserdiodenstrom I_{LD} übersetzt. Aus der Monitor-diode wird der Strom I_{MD} ausgelesen und als Regelgröße zurück zum Laserregler übertragen. Damit ist der Regelkreis geschlossen.
8. Im Block Messwerteaufbereitung wird unterdessen das Messwertepaar (p, \hat{t}) in kartesische Koordinaten (x, z) übersetzt. Mit Kenntnis der Kalibrierparameter erfolgt dies über die Gleichungen (5.4), (5.7) und (5.13).
9. Die Entfernung z wird an die Fokussteuerung übermittelt. Dort wird die erforderliche Fokusposition df nach einer voreingestellten Fokussierstrategie nach Abschnitt 5.2.10 ermittelt. Der Fokusregler fährt ggf. eine neue Motorposition an.
10. In der Messwerteaufbereitung werden die Messwerte mehrerer Messtakte gesammelt über WB an die Ethernet Steuerung übermittelt. Dort werden sie in UDP Pakete verpackt und weiter an den externen Ethernet Controller übertragen.

Während der Kalibrierung des VR-SCAN wird die relative Kalibrierentfernung Δz_c über einen optional angeschlossenen Lineartisch mit Inkrementalgeber gemessen (vgl. Kapitel 6). Die Impulse werden im Inkrementalzähler ausgewertet und als weiterer Messwert an die Messwerteaufbereitung übertragen.

Die Implementierung von trigonometrischen Funktionen und Divisionen, besonders bei der Peak Prozessierung und der Übersetzung in kartesische Koordinaten, kann z. B. durch Lookup Tabellen oder einen CORDIC²⁶ Algorithmus [5] gelöst werden.

Die hier skizzierte Architektur im FPGA ist eine Möglichkeit der Implementierung. Je nach zukünftigen Anwendungsfällen können weitere Blöcke hinzukommen oder auch in eine PC-Architektur ausgelagert werden. Das FPGA soll daher ausreichend groß gewählt werden, um Raum für zukünftige Änderungen oder Erweiterungen zu bieten. Die Wahl fällt auf ein Xilinx Virtex 5.²⁷ Zu den Details der FPGA Implementierung siehe Abschnitt 5.3.5.

5.2.14 Design

In erster Linie muss die äußere Gestaltung des VR-SCAN die Anforderungen aus Tabelle 5.1 erfüllen. Im Vordergrund stehen die Flanschpositionen und die Greifbarkeit durch den Menschen (vgl. Abbildung 2.7 und Tabelle 2.5). Es wurden verschiedene Gehäuse- und Griffformen sowie die Bedienbarkeit untersucht, um ein optimales Design zu erreichen. Dabei wurde darauf geachtet, dass der Roboterbetrieb als primärer Einsatzzweck nicht eingeschränkt wird [80]. Außerdem sollen Tasten zur Handbedienung und Statusleuchten integriert werden, sowie Lüftungsschlitze vorgesehen sein.

²⁶Coordinate Rotation Digital Computer

²⁷www.xilinx.com

5.3 Der VR-SCAN

Aufgrund der gewünschten kleinen Abmessungen und des geringen Gewichtes ist eine hohe Integrationsdichte der Komponenten notwendig. Dies erfordert eine leichte und gleichzeitig stabile mechanische Konstruktion. Die elektronischen Bauteile müssen platzsparend auf die Platinen verteilt werden. Die entstehende Abwärme darf das Messergebnis nicht beeinflussen.

In den nächsten Abschnitten wird die mechatronische Konstruktion und FPGA Implementierung des VR-SCAN Prototypen beschrieben: Der folgende Abschnitt präsentiert einen Überblick über das Gesamtsystem. Abschnitt 5.3.2 beschreibt detailliert den Aufbau des Scankopfes, die Konstruktion der Kamera wird in Abschnitt 5.3.3 dargestellt. Der Aufbau der Elektronik wird in Abschnitt 5.3.4 behandelt. In Abschnitt 5.3.5 wird die FPGA Implementierung skizziert und Abschnitt 5.3.6 beschreibt kurz die Grundgedanken des Designs.

5.3.1 Gesamtsystem

Eine Fotografie des fertigen VR-SCAN zeigt Abbildung 5.16. Abbildung 5.17 präsentiert einen Überblick über die mechatronische Konstruktion: Ein stabiler Rahmen verbindet das zylindrische Gehäuse der Zeilenkamera mit dem Scankopf. Die fasergekoppelte Laserdiode ist seitlich am Hilfsrahmen angebracht, wobei auf gute thermische Kopplung geachtet wurde. Die Faser ist unter Beachtung des maximalen Biegeradius um die Kamera aufgewickelt und durch eine Halterung fixiert. Die Elektronik ist auf mehrere Platinen aufgeteilt und platzsparend um den Rahmen herum gruppiert. Es sind spielfreie und schnell montierbare Kupplungen an zwei Positionen zur Befestigung am Roboter oder einem Greifer vorgesehen. Sie sind rechtwinklig zueinander angeordnet und werden optional montiert.

Gleichung (3.7) gibt den Gesamtfehler der Triangulation in z -Richtung an. Die Messung ist demnach sehr empfindlich gegenüber Winkelfehlern $\Delta\alpha$. Die mechanische Konstruktion muss dies bezüglich der Steifigkeit und der thermischen Ausdehnung der Materialien berücksichtigen. Torsionen der mechanischen Bauteile in der Rotationsachse des MEMS Spiegels (y -Achse) gehen direkt als Winkelfehler in die Messung ein. Translatorische Dehnung ist hingegen vernachlässigbar, da die geometrischen Größen F und B gegenüber der mechanischen oder thermischen Ausdehnung groß sind. Der Rahmen ist daher auf große Biegesteifigkeit um die y -Achse ausgelegt.

Die thermische Ausdehnung wurde durch eine FEM²⁸ Analyse überprüft. Das Ergebnis ist in Abbildung 5.18a dargestellt: Mit der Befestigung des Scankopfes als Fixpunkt auf der linken Seite an den beiden rot markierten Stellen verschiebt sich die äußerste

²⁸Finite-Elemente-Methode



Abbildung 5.16: Der DLR *VR-SCAN*

rechte Kante (grün markiert) um maximal $94 \mu\text{m}$, hauptsächlich in z -Richtung²⁹. Simuliert wurde eine Temperaturdifferenz von 50 K mit dem Material Aluminium. Der Basisabstand $B = 60 \text{ mm}$ ändert sich aufgrund dieser Translation um maximal $0,16 \%$, der resultierende Fehler liegt in der gleichen Größenordnung.

Die translatorische Wärmedehnung kann jedoch auch zu einer Rotation führen: Die maximale Differenz der translatorischen Ausdehnung entlang der in Abbildung 5.18a grün markierten Kante in z -Richtung des eingezeichneten Koordinatensystems lässt auf die thermische Rotation schließen: Der Gradient der Verschiebung beträgt maximal 85 nm auf 14 mm Kantenlänge. Dies entspricht einer Rotation um die y -Achse von $6 \mu\text{rad}$ (in der Zeichnung nicht dargestellt). Der Fehler ist geringer als der maximal zulässige Fehler nach Gleichung (5.16) und daher vernachlässigbar.

Es zeigte sich jedoch, dass die Konstruktion der Befestigung des Scankopfes nennenswerten Einfluss auf die thermische Rotation hat: Erfolgt die Verschraubung an vier Punkten, wie in Abbildung 5.18b durch rote Markierungen dargestellt, so führt das im Fall unterschiedlicher Wärmedehnung zwischen Scankopf und Rahmen zu Verspannungen, die eine deutlich größere Rotation der Kameraaufnahme um die y -Achse von $0,13 \text{ mrad}$ zu Folge haben. Dies überschreitet die Genauigkeitsanforderung an den Scanwinkel aus Gleichung (5.16), weshalb der Scankopf an nur zwei Punkten spannungsfrei verschraubt werden darf. Auf diese Weise kann der Scankopf im Fall verschiedener Wärmedehnung frei auf dem Rahmen gleiten.

²⁹Beachte: Das Koordinatensystem der FEM Simulation ist verschieden vom sonst verwendeten KS des *VR-SCAN*

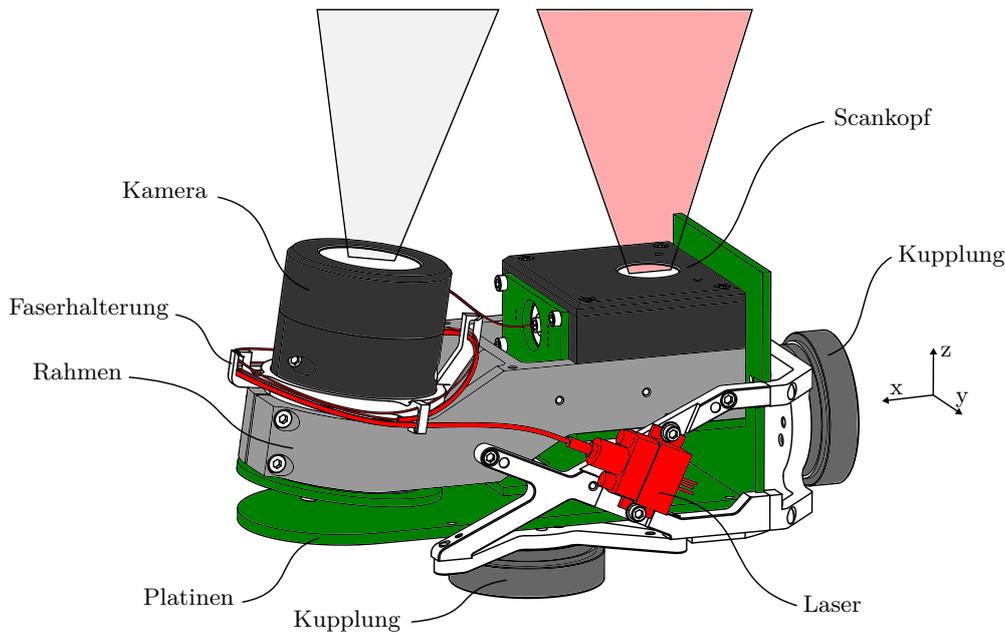


Abbildung 5.17: Der VR-SCAN Prototyp

Weitere Rotationen aus translatorischer Wärmedehnung und/oder Verspannungen sind aufgrund der Symmetrie der Konstruktion und der Materialgleichheit nicht zu erwarten.

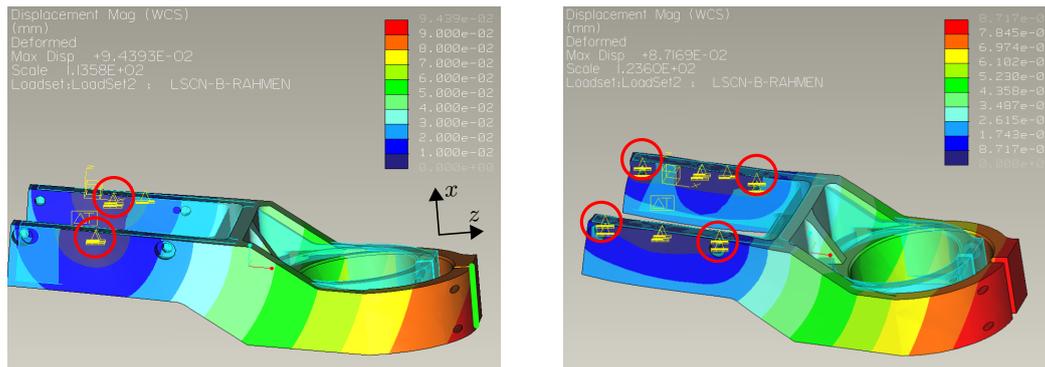
5.3.2 Scankopf

Der Querschnitt des VR-SCAN (Abbildung 5.19) zeigt das Innere des Scankopfes. Um die feinen Strukturen des offen betriebenen MEMS Spiegel nicht durch Staub zu gefährden, kann das Gehäuse abgedichtet werden.

Der kollimierte Laserstrahl wird durch einen Graufilter abgeschwächt, bevor er den MEMS Spiegel trifft. Ziel dieser Maßnahme ist es, den Laser stets im linearen Bereich der Laserdiodenkennlinie zu betreiben, um die Leistungsregelung zu vereinfachen. Nach den Berechnungen zur Laserklassifizierung (Anhang C) darf die maximale Laserleistung 1,8 mW nicht überschreiten, während die ausgewählte Laserdiode fast das Zehnfache dieser Leistung (17 mW) liefert. Durch gezielte Abschwächung durch den Graufilter lässt sich die gesamte Leistungsbandbreite des Lasers nutzen. Außerdem wurden sporadisch Instabilitäten des Lasers (Modensprünge) im Knickbereich der Kennlinie beobachtet, was durch den Graufilter ebenfalls umgangen werden kann.

Die Lagerung des MEMS Spiegels ist derart gestaltet, dass sich das Substrat des Gehäuses thermisch spannungsfrei ausdehnen kann. Daher ist das MEMS Gehäuse (vgl. auch Abbildung 5.2 auf Seite 51) durch Federbügel mit dem Lagerblock verbunden. Auf

5 Entwicklung des VR-SCAN



(a) Befestigung des Scankopfes an 2 Punkten (rot markiert) (b) Befestigung des Scankopfes an 4 Punkten (rot markiert)

Abbildung 5.18: FEM Analyse der thermischen Ausdehnung des Rahmens

diese Weise sollen thermische Verspannungen im Silizium des MEMS Chips und damit in den Torsionsfedern verringert werden. Durch unterschiedliche Vorspannung der Federn würde die Resonanzfrequenz des Spiegels beeinflusst werden.

Das 2x1 Photodiodenarray der Indexmarke, das Fenster, sowie das Faserende des Lasers mit der Kollimatoroptik sind ebenfalls im Scankopfgehäuse untergebracht. Das thermische Ausdehnungsverhalten des Gehäuses muss berücksichtigt werden: Wie in Abschnitt 5.2.3 hergeleitet, hat die translatorische Wärmedehnung Auswirkungen auf das Messergebnis. Es gilt Bedingung (5.22), also $\alpha_T < 1,06 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Da eine gleichmäßige und damit winkeltreue Ausdehnung des Scankopfes nicht garantiert werden kann, wird das Gehäuse und die MEMS Lagerung aus der Eisen-Nickel Legierung Invar³⁰ gefertigt. Der spezifische Wärmeausdehnungskoeffizient von Invar beträgt lediglich $1,2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, womit die Bedingung annähernd erfüllt wird.

5.3.3 Kamera

Das Kameragehäuse ist rotationssymmetrisch aufgebaut (Abbildungen 5.19 und 5.17). Durch die Symmetrie sind keine Winkelfehler durch thermische Dehnungen zu erwarten. Im abschraubbaren Deckel des Gehäuses ist der Bandpassfilter eingeklebt. Den Boden bildet die Platine mit dem aufgelöteten Zeilensensor. Die Starrflexplatine ist zweiteilig ausgeführt. Die gebogene flexible Verbindung erlaubt kleine Verdrehungen des Kameragehäuses in der Klemmung des Rahmens, um den Sichtbereich mit dem Scanbereich in Deckung zu bringen.

Abbildung 5.20 zeigt die Konstruktion der Fokussiereinrichtung und der Linsenaufhängung. Die Linsenfassung kann, durch eine Führungsfeder vorgespannt, spielfrei auf den

³⁰Handelsname von FeNi36, Werkstoffnummer 1.3912

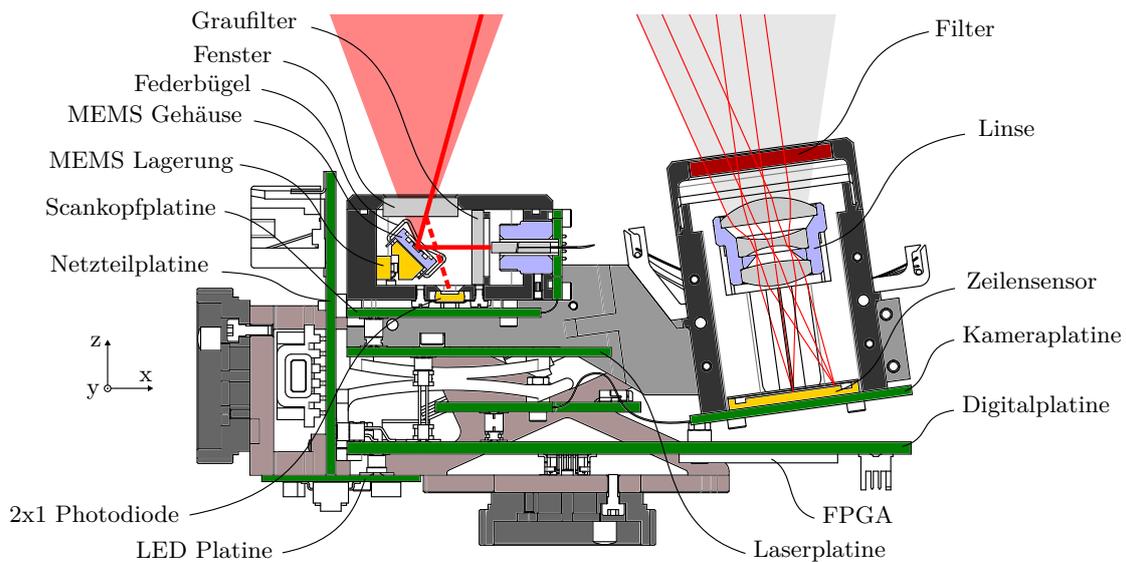


Abbildung 5.19: Querschnitt durch den VR-SCAN Prototyp

zylindrischen Führungen gleiten. In axialer Richtung ist sie durch eine Druckfeder vorgespannt. Der Piezomotor bewegt die Linse gegen die Feder und ist dadurch nur auf Druck beansprucht. Der Positionssensor wertet die Position des mit der Fassung verklebten Magnetstreifens aus.

5.3.4 Elektronik

Die elektronische Hardware setzt die in Abbildung 5.15 dargelegte Systemarchitektur außerhalb des FPGA um. Das Erstellen des Schaltplans sowie das Platinenlayout war nicht Teil der Arbeit des Autors. In diesem Abschnitt wird daher die Elektronikentwicklung kurz zusammengefasst:

Die Anforderungen an das Platinenlayout sind wie folgt:

- Geringer Platzbedarf
- Gute Austauschbarkeit und Erreichbarkeit (Wartung, Inbetriebnahme)
- Kurze Anbindung der analogen Bauteile (EMV³¹)
- Gute Wärmeabfuhr

Die Anordnung der Platinen ist in Abbildung 5.19 ersichtlich. Die Aufteilung auf mehrere übereinander gestapelte Platinen ermöglicht ein platzsparendes und modulares Layout. Durch die Modularität können die Platinen jeweils einzeln getestet und in Betrieb

³¹Elektromagnetische Verträglichkeit

5 Entwicklung des VR-SCAN

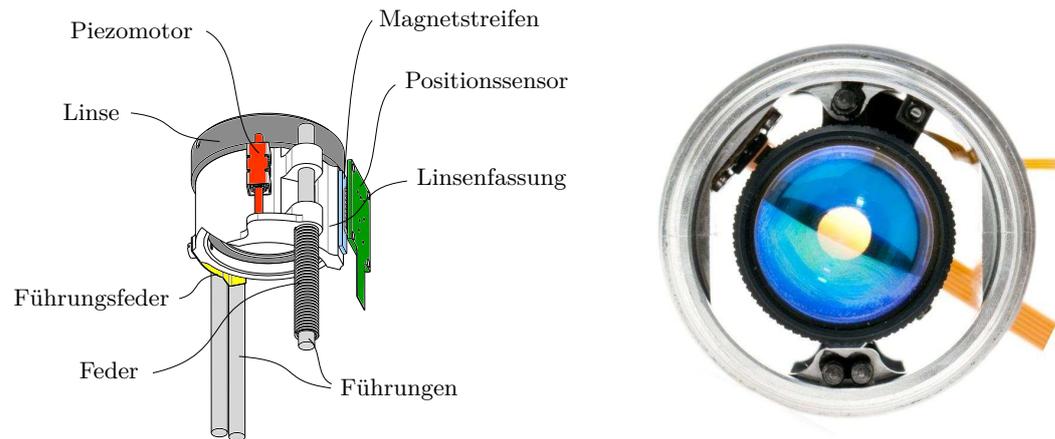


Abbildung 5.20: Fokussiereinrichtung

genommen werden. Die analogen Treiberschaltungen von Laser, MEMS Spiegel, Indexmarke und Zeilensensor sind unmittelbar an den jeweiligen Bauteilen untergebracht. So können Störeinflüsse minimiert werden. Die Einzelbaugruppen sind über Pfostenstecker verbunden, auf platzraubende Kabelverbindungen kann weitgehend verzichtet werden. Lediglich die Laserdiode, die seitlichen Taster und die Fokuskomponenten sind über Kabel angebunden.

Das FPGA auf der Digitalplatine ist als das Bauteil mit der größten Wärmeentwicklung möglichst weit von der tragenden Struktur entfernt unter der Kamera platziert. Die exponierte Stelle ermöglicht zudem effektive Kühlung durch Konvektion. Die Scankopf- und Kameraplatine sind Starrflexplatinen.

Die Elektronik ist auf folgende Baugruppen aufgeteilt:

- *Scankopfplatine*: Die Platine enthält die Auswertungs elektronik der Indexmarke und die Treiberstufe des MEMS Spiegels. Sie ist mit dem Scankopfgehäuse verschraubt. Die Indexmarke wird über einen Komparator ausgewertet, der die Gleichheit der Ströme des 2x1 Photodiodenarrays unabhängig vom Umgebungslicht und der Laserleistung ermittelt. Die Schaltzeit liegt unter der Anforderung aus Gleichung (5.24) (111 ns). Um unkontrolliertes Schalten zu verhindern, falls der Laser ausgeschaltet ist, wird der Komparator nur dann aktiviert, wenn der Laser eines der beiden Felder beleuchtet. Der MEMS Treiber erzeugt die Spannung U mittels PWM³² und schaltet diese zu einem Rechtecksignal.
- *Laserplatine*: Sie beinhaltet die Regelung des Laserdiodenstromes I_{LD} und die Verstärkung des Monitordiodenstromes I_{MD} . Schnittstellen sind der A/D-Wandler

³²Pulsweitenmodulation

und D/A-Wandler der beiden Ströme, die jeweils über SPI Bus mit dem FPGA verbunden sind. Durch eine Sicherheitsschaltung sind I_{LD} und I_{MD} zum Schutz des Lasers begrenzt, und die Laserdiode muss über einen gesonderten Digitaleingang aktiviert werden (Lasersicherheit im FPGA). Die Schaltung ist auf Messtaktgeschwindigkeit (≈ 40 kHz) ausgelegt: Berücksichtigt man die Signalübertragungszeiten via SPI, kann der Laseregler mit bis zu 192 kHz (bei 100 MHz FPGA Takt und 20 MHz SPI Takt) betrieben werden [15].

- *Kameraplatine*: Der Zeilensensor wird direkt vom FPGA über JTAG gesteuert. Die Pixel werden sequentiell über zwei Ports mit je 40 MHz ausgelesen, verstärkt und an zwei A/D-Wandler geschickt. Die Datenleitungen sind parallel am FPGA angeschlossen.
- *Netzteilplatine*: Diese Platine implementiert einen Power-over-Ethernet Teilnehmer nach IEEE-Standard 802.3af-2003. Aus der Verbindung werden die Hauptversorgungsspannung 3,3 V und 30 V für den MEMS Spiegel erzeugt. Die Ethernet-Signale werden davon entkoppelt.
- *LED-Platine*: Über einen LED Controller Baustein werden 6 dreifarbig (RGB) LED angesteuert. Der Controller kommuniziert über I²C mit dem FPGA. Zusätzlich ist ein Taster auf der Platine untergebracht.
- *Digitalplatine*: Das FPGA, der Flash Speicher und der Ethernet Controller befinden sich auf der Digitalplatine. Alle anderen Platinen sind sternförmig mit dieser Platine verbunden. Ein Stecker bietet Zugang zu einigen Zusatzpins des FPGA, u. a. kann daran der Lineartisch zur Kalibrierung angeschlossen werden. Ein JTAG Stecker zur Konfigurierung des FPGA ist ebenfalls bestückt.

5.3.5 FPGA Implementierung

Im FPGA ist die Systemarchitektur nach Abbildung 5.15 weitgehend vollständig implementiert. Zum Zeitpunkt des Verfassens dieser Arbeit waren lediglich noch nicht alle Blöcke am Wishbone Bus angeschlossen.

Das FPGA ist mit 100 MHz getaktet. Es werden daraus drei Taktdomänen mit 50, 80 und 100 MHz abgeleitet: Manche präzisen CORDIC Divisionen laufen aufgrund der langen Signallaufzeit mit 50 MHz. Die gesamte Kommunikation mit dem Zeilensensor sowie die Peak Prozessierung nutzt die 80 MHz Domäne, während die übrigen Blöcke mit 100 MHz getaktet werden.

Alle Blöcke wurden einzeln in der Hardwarebeschreibungssprache VHDL³³ implementiert und verifiziert.

Beispielhaft werden die folgenden Blöcke kurz beschrieben:

³³Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language

- *MEMS Regler*: Das Ansteuersignal des MEMS Spiegels wird außerhalb des FPGA in der Treiberschaltung aus der Amplitude der Ansteuerspannung U und der Periodenlänge des Rechtecksignals erzeugt. Im FPGA sind Zähler für die Pulsweite der PWM und die Periode des Rechtecksignals implementiert. Nach Schalten des Aktivierungssignals wird der MEMS Spiegel hochgefahren, indem die Startsequenz eine Frequenz- und Amplitudenrampe erzeugt. Die Indexmarke wird ständig abgetastet. Sobald stabile Zeitpunkte $t_{1,2}$ geliefert werden, werden die Rampen ab- und die Regelung eingeschaltet. Der Offset der Reglerausgänge wird jeweils auf die momentan anliegende Pulsweite und Periodenlänge abgeglichen. Die abgetasteten Zeitpunkte $t_{1,2}$ werden durch die momentane Periodenlänge dividiert und somit der normierte Zeitstempel der MEMS Schwingung \hat{t} und dessen normierte Phase $\hat{\varphi}$ erzeugt. Die Division wird mittels zweier CORDIC Blöcke [5] verwirklicht, die aufgrund der erforderlichen Präzision und der resultierenden langen Signallaufzeit mit 50 MHz getaktet sind. Die Signalübergänge zwischen den Taktdomänen werden über synchronisierte FIFO-Puffer realisiert. Die normierten Signale dienen als Rückführungsgrößen der Phasen- und Amplitudenregelung (vgl. Abschnitt 5.2.4). Es wurden parametrierbare generische PID Reglerblöcke implementiert, die ebenfalls in der Fokus- und Laserregelung verwendet werden. Die Reglerabweichungen werden überwacht und als Qualitätswerte für die Schwingung ausgegeben. Beim Überschreiten fester Grenzen wird der Spiegel gestoppt und in Folge der Laser durch die Lasersicherheit ausgeschaltet.
- *Peak Prozessierung*: Der Algorithmus nach Abschnitt 5.2.11 ist als Pipeline in drei Stufen verwirklicht: 1. Zunächst wird für jede Zeile während des Auslesens das Maximum, der Durchschnitt und die Varianz online berechnet. Der Rauschabstand und das Rauschniveau werden ermittelt. 2. Der Peak wird oberhalb eines vom Rauschniveau abhängigen Schwellwertes freigestellt. 3. Die Peakposition wird nach (5.34) berechnet. Die Sinus- und Kosinuswerte werden einer Lookup Tabelle entnommen, der Arcustangens 2 über einen CORDIC ermittelt.

Die Implementierung des Laserreglers und der Lasersicherheit kann im Detail in [15] nachgelesen werden.

5.3.6 Design

Das Design des Gehäuses wurde von Wüsthoff und Rücker [80] durchgeführt. Es wurde derart gestaltet, dass es die äußeren Abmessungen möglichst klein hält. Abbildung 5.21 zeigt den Scanner als handgeführten Sensor. Die Zugangsöffnungen zur Befestigung der Kupplungen sind bei Nichtgebrauch abdeckbar. Der Scanner ist gut für den Menschen greifbar und durch seitliche Tasten bedienbar. Statusleuchten und Lüftungsschlitze wurden integriert. Am Roboter montiert ist der VR-SCAN in Abbildung 5.16 zu sehen.



Abbildung 5.21: Der VR-SCAN als handgeführter Sensor

6 Kalibrierung und Ergebnisse

Um Messungen durchführen zu können, ist eine Kalibrierung des *VR-SCAN* notwendig. Damit können die rohen Messwerte α, p, df zur weiteren Verwendung in kartesische Koordinaten x, z überführt werden. Die Verwendung und Verifizierung des Systems in der Realität wird so ermöglicht.

Nach der Beschreibung des Testaufbaus zur Verifikation der Einzelkomponenten wie auch zur Kalibrierung des Gesamtsystems im ersten Abschnitt wird das Verfahren zur Kalibrierung des *VR-SCAN* hergeleitet (Abschnitt 6.2). In Abschnitt 6.3 wird auf die systematischen Fehlereinflüsse eingegangen. Nach der Beschreibung der Verifikationsmessungen in Abschnitt 6.4 werden die Ergebnisse in Abschnitt 6.5 zusammenfasst.

6.1 Testaufbau

Abbildung 6.1 zeigt den Prüfstand zur Evaluierung und Integration der Komponenten, sowie zur Kalibrierung. Das abgebildete System befindet sich im Stadium der Entwicklung: Die mechanischen und optischen Komponenten des *VR-SCAN* sind bereits fertiggestellt, die integrierte Elektronik war noch nicht vollständig verfügbar. Die Scankopfplatine mit MEMS Treiber und Indexmarkenauswertung war bereits in Verwendung. Der Prüfstand bestand außerdem aus einem FPGA Entwicklungsboard¹ und einer kommerziellen Kamera², die über einen CameraLink Framegrabber am PC angeschlossen war. Die Bildverarbeitung fand offline im PC statt.

Der Kalibrierenaufbau besteht aus einem Balken mit bekanntem Tiefenprofil (Sinus). Er ist auf einem Lineartisch in z -Richtung des Scannerkoordinatensystems montiert. Die Position des Lineartisches wird über einen Glasmessstab mit Inkrementalgeber³ auf $10 \mu\text{m}$ genau gemessen. Der gesamte Aufbau ist auf einer schwingungsgedämpften optischen Bank befestigt. Diese bietet eine stabile, ebene Grundfläche und gleichzeitig eine Entkopplung von Erschütterungen.

¹ML506 Development platform mit Virtex-5 SX50 (www.xilinx.com)

²Fairchild Owl mit dem ausgewählten CMOS 1421 Zeilensensor (www.fairchildimaging.com)

³Heidenhain LS 328C (www.heidenhain.de)

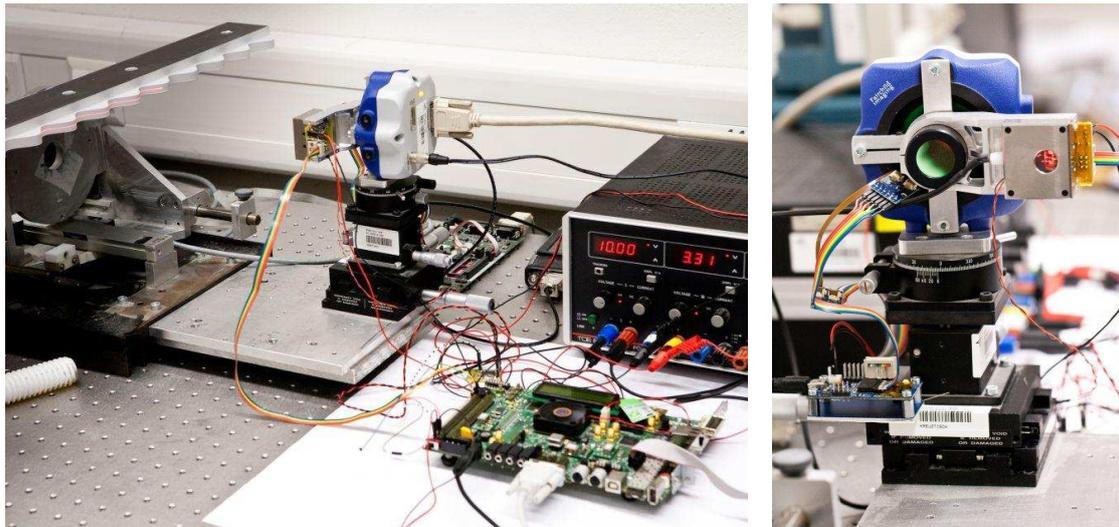


Abbildung 6.1: Prüfstand zur Integration und Kalibrierung

6.2 Kalibrierung

Im *VR-SCAN* existieren zwei voneinander unabhängige Systeme, deren Verhalten durch Parameter beschrieben ist: Der MEMS Spiegel und die Zeilenkamera (vgl. Kapitel 5). Diese Parameter, sowie die geometrische Orientierung der Systeme zueinander, sind unbekannt und müssen durch Kalibrierung ermittelt werden.

In der Kamerakalibrierung ist es üblich, eine ebene Platte mit bekanntem Muster aufzunehmen. Aus mehreren Aufnahmen aus verschiedenen Entfernungen und Blickwinkeln werden sowohl die intrinsischen Verzeichnungsparameter der Kamera als auch die jeweilige Position und Orientierung der Platte zur Kamera ermittelt (extrinsische Parameter) [89, 109]. Diese Vorgehensweise betrifft hauptsächlich passive Matrixkameras, wobei das Verfahren prinzipiell auch auf Zeilenkameras anwendbar ist: In [66] werden die Schnittpunkte der Kameraebene mit einem bekannten Linienmuster erkannt. Im Fall der *VR-SCAN* Zeilenkamera führt das jedoch zu Problemen: Sie ist aufgrund der Ausstattung mit einem schmalbandigen Filter auf aktive Beleuchtung durch den Laser ausgelegt. Ohne diese starke Beleuchtung oder ein aktives Kalibriermuster ist die Kalibrierung nicht möglich.

Zur Kalibrierung des Bewegungsmodells des MEMS Spiegels ist es erforderlich, die Spiegelbewegung zu messen. Das erforderliche Messsystem muss gemäß der Bedingung (5.16) auf $53 \mu\text{rad}$ auflösen. Gleichzeitig müssen pro Schwingungsperiode hinreichend viele Stützstellen gemessen werden, um das kontinuierliche Bewegungsmodell anzupassen. In [82] wird folgende Messmethode vorgestellt: Ein Laserstrahl wird vom Spiegel abgelenkt und von einem radialen Strichgitter auf eine Photodiode in unmittelbarer Nähe des

Spiegels reflektiert. Die Präzision der Methode ist mit angegebenen $0,1^\circ = 1,7 \text{ mrad}$ jedoch unzureichend. Wie schon zuvor erwähnt, erfüllt die eigene, im *VR-SCAN* verbaute Zeilenkamera, nebst Laser, die Anforderungen an das Messsystem.

Es liegt also nahe, die Kalibrierung der voneinander unabhängigen Systeme Zeilenkamera und MEMS Spiegel gemeinsam unter Verwendung des Lasers vorzunehmen. Beide Komponenten kalibrieren sich gegenseitig. Das im Folgenden beschriebene Verfahren wurde 2011 erfolgreich patentiert [59].

6.2.1 Grundlagen

In Abschnitt 5.2.1 wurde der Zusammenhang der geometrischen Größen der Triangulation hergeleitet. Der Triangulationswinkel β wird nach Gleichung (5.6) berechnet. Eingangsgrößen sind die Messgrößen p, df (Bildkoordinate auf dem Detektor, Fokusposition) und die beiden geometrischen Parameter F, Φ (Abstand Detektor-Linse, Neigungswinkel der Kamera). Die Messgröße p der Zeilenkamera wird nach Gleichung (5.8) durch die Parameter k_1, k_2 entzerrt.

Die Indexmarke misst an der Position α_m die Zeitdifferenzen $\Delta t_{\text{ph}}, \Delta t_A$ zur Rekonstruktion der Grundschiwingung. Mit den Gleichungen (5.19) und (5.20) werden daraus die Amplitude A und Phase $\hat{\varphi}_0$ der Grundschiwingung berechnet. Der Scanwinkel α folgt aus der Gleichung des normierten Spiegelmodells (5.13). Zusätzlich zur Grundschiwingung wird die Fourierreihe bis zur elften Harmonischen mit 10 weiteren Parametern $a_k, \hat{\varphi}_k$ beschrieben ($k = \{3, 5, \dots, 11\}$).

Es zeigte sich in der Praxis, dass zwei weitere Parameter zur Beschreibung der Schwiwingung hilfreich sind: Eingeführt werden die Verkippung a_0 des MEMS Spiegels um die y -Achse und der Phasen-Offset der Phase der Grundschiwingung $\hat{\varphi}_{\text{off}}$. Die Verkippung a_0 berücksichtigt die um diesen Winkel fehlerhafte Einspannung des *VR-SCAN* in die Kalibriervorrichtung. Der Phasen-Offset $\hat{\varphi}_{\text{off}}$ trägt der Tatsache Rechnung, dass die Synchronisierung der Spiegelschiwingung mit der nicht beliebig kurzen Belichtung der Zeilenkamera nicht perfekt sein kann: Durch die während der Belichtung andauernde Bewegung des Lasers entsteht Bewegungsunschärfe und damit eine Verschiebung des Peaks. Diese Verschiebung lässt sich zeitlich abbilden und findet mit der Reset-Dauer des CMOS Zeilensensors Berücksichtigung in diesem Parameter. Das Spiegelmodell (5.13) wird also zu

$$\alpha = \frac{a_0}{2} + \sum_k A a_k \cos \left(2 \pi k \left(\hat{t} - \hat{\varphi}_k - \hat{\varphi}_0 - \hat{\varphi}_{\text{off}} \right) \right) \quad \left| \begin{array}{l} k = \{1, 3, \dots, 11\} \\ \hat{\varphi}_1 = 0, a_1 = 1 \end{array} \right. \quad (6.1)$$

erweitert.

Die Winkel α und β werden mit den Gleichungen (5.4) und (5.7) zu den kartesischen Koordinaten x, z trianguliert. Die Messgröße df sowie die 3 geometrischen Parameter B, S_1, Φ werden dazu benötigt.

Tabelle 6.1: Messgrößen, Parameter und Modellgrößen des *VR-SCAN*

System	Messgröße	abgeleitet	Parameter \mathbf{p}	Modellgröße
Zeilenkamera	p, df		F, Φ, k_1, k_2	β
MEMS Spiegel	$f^a, \Delta t_{\text{ph}}, \Delta t_A$	$\hat{t}, A, \hat{\varphi}_0$	$\alpha_m, a_k, \hat{\varphi}_k, a_0, \hat{\varphi}_{\text{off}}$	α
Triangulation	df	α, β	B, S_1	x, z
Kalibrierung	Δz_c^b		z_{c0}, x_{c0}	x_c, z_c

^a Die Frequenz f ist Ausgang des Phasenreglers, und damit Stellgröße und keine Messgröße.

^b Als „wahr“ angesehene Kalibriergröße.

In Tabelle 6.1 sind die Messgrößen, Modellgrößen und Parameter des *VR-SCAN* zusammengefasst. Die Größen sind nach Systemen geordnet: Die unabhängigen Systeme MEMS Spiegel und Zeilenkamera bestimmen die Modellgrößen α und β . Zusammen entsteht der Triangulationsscanner und daraus die Koordinaten (x, z) . Es müssen insgesamt 19 unbekannte Parameter durch ein geeignetes Kalibrierverfahren bestimmt werden.

6.2.2 Kalibrierverfahren

Die Kalibrierung eines unbekanntes Systems muss durch die Messung von Größen geschehen, die entweder genau bekannt sind, oder als „wahr“ angesehen werden. Diese sogenannte „Ground Truth“ sollte in ihrer Gestalt und Genauigkeit auf das Messverfahren angepasst sein. In diesem Fall liegt es nahe, die Entfernung z durch ein um Größenordnungen genaueres Messsystem, als es der *VR-SCAN* ist, zu bestimmen. Der oben beschriebene Lineartisch bietet mit $10 \mu\text{m}$ ausreichende Genauigkeit.

Es soll also eine bekannte Geometrie in mehreren unterschiedlichen Entfernungen gescannt werden. Bei Verwendung einer Ebene als Kalibrierfläche bleibt die Parallaxe der Abbildung die einzige Größe, die Einfluss auf die Skalierung der Parameter hat. In diesem Fall ist es ratsam, durch ein Muster den Maßstab zu konditionieren, analog zur Vorgehensweise bei der Matrixkamerakalibrierung. Der Nachteil dieses Verfahrens ist, dass die Mustergrenzen gesondert segmentiert werden müssen. Eine weitere Möglichkeit wird in [17, 108] beschrieben: Dort wird eine Ebene in z -Richtung verschoben und zwischen mehreren Messungen um einen bekannten Winkel verkippt. Durch die Verwendung eines periodischen Profils werden die oben beschriebenen Nachteile vermieden und es wird keine Verkipfung benötigt, was die Messung einer weiteren Größe erfordern würde. Durch das Profil sind die messbestimmenden Winkel und der Abbildungsmaßstab sehr gut konditioniert.

Die Form des Tiefenprofils ist bekannt. Es wird auf dem Lineartisch montiert und zwischen den einzelnen Messungen in z -Richtung verschoben (vgl. Abbildung 6.1). Das Profil

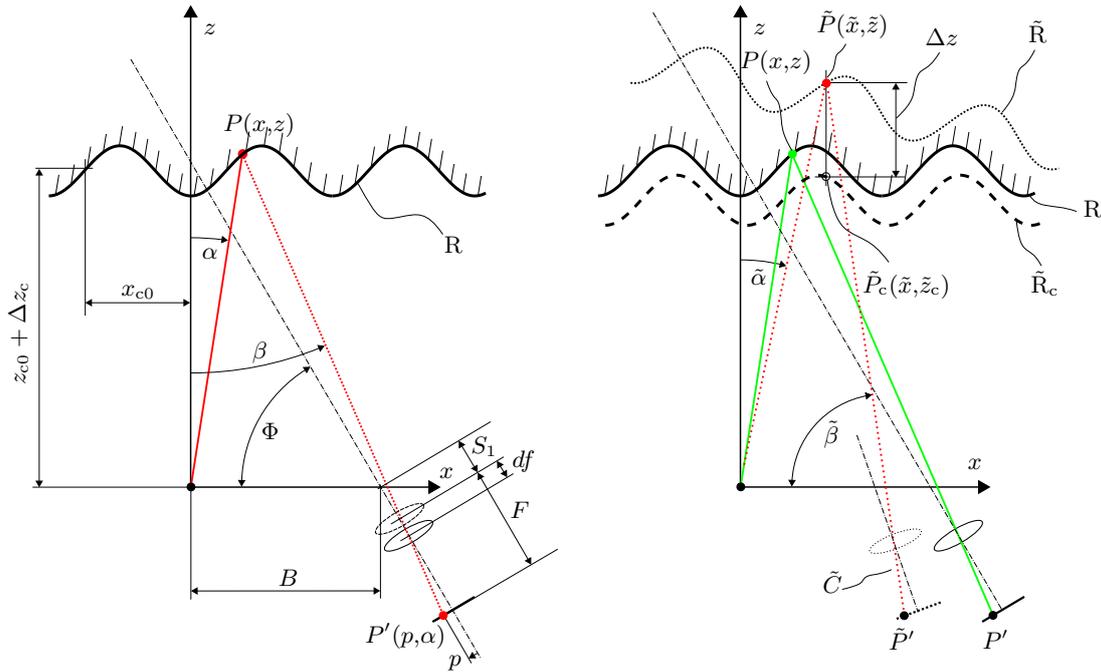


Abbildung 6.2: Kalibrierverfahren des VR-SCAN

ist sinusförmig mit 7,5 mm Amplitude und 50 mm Periodenlänge. Die Punkte des Profils (x_c, z_c) werden durch die Gleichung

$$z_c / [\text{mm}] = 7,5 \cdot \cos(0,04 \cdot (x_c + x_{c0}) \cdot \pi) + z_{c0} + \Delta z_c \quad (6.2)$$

parametrisiert. Dabei ist (x_{c0}, z_{c0}) die unbekannte Anfangsposition. Diese beiden Parameter müssen ebenfalls ermittelt werden, wodurch die Gesamtzahl der Unbekannten auf 21 wächst. Der gesamte Satz an zu bestimmenden Parametern wird nun als

$$\mathbf{p} = \{F, \Phi, B, S_1, z_{c0}, x_{c0}, k_1, k_2, \alpha_m, a_0, \hat{\varphi}_{\text{off}}, a_3, a_5, \dots, a_{11}, \hat{\varphi}_3, \hat{\varphi}_5, \dots, \hat{\varphi}_{11}\} \quad (6.3)$$

bezeichnet (vgl. Tabelle 6.1).

Die als „wahr“ angesehenen Größen sind die vom Lineartisch gemessene relative Distanz Δz_c und die Form des Profils. Die Oberfläche ist mit weißem Entwicklerspray⁴ behandelt, um eine möglichst gleichmäßig diffuse Reflexion zu erreichen.

Abbildung 6.2 (links) verdeutlicht den Kalibrierbau: Es ist die Lage des Tiefenprofils R abgebildet. Dieses befindet sich zu Anfang der Kalibrierung in der Position (x_{c0}, z_{c0}) und wird zwischen den einzelnen Kalibrierscans in z -Richtung um Δz_c verschoben. Die Ausrichtung der Verschiebungsachse auf die z -Achse geschieht manuell mit Hilfe des

⁴ Diffu-therm Entwickler von H. Klumpf Techn. Chemie KG, Herten

Laserstrahls, der bei ausgeschaltetem MEMS Spiegel ($\alpha = 0$) mit der z -Achse zusammenfällt. Die verbleibende Ungenauigkeit dieser Methode ist im Parameter a_0 in Gleichung (6.1) berücksichtigt.

Auf der rechten Seite in Abbildung 6.2 ist das Kalibrierverfahren illustriert: Die Punkte P auf dem Tiefenprofil in der „wahren“ Lage R werden gescannt und auf die Punkte P' abgebildet. Unter Verwendung eines Satzes von Parametern $\tilde{\mathbf{p}}$, der von den wahren Parametern verschieden ist, wird die imaginäre Kameraposition \tilde{C} unter dem Triangulationswinkel $\tilde{\beta}$ berechnet. Zusammen mit dem ebenfalls aus $\tilde{\mathbf{p}}$ errechneten imaginären Scanwinkel $\tilde{\alpha}$ ergeben sich die Punkte $\tilde{P}(\tilde{x}, \tilde{z})$ auf dem imaginären Profilverlauf \tilde{R} . Die Koordinaten (\tilde{x}, \tilde{z}) werden mit den Gleichungen (5.4) und (5.7) aus Abschnitt 5.2.1 (Seite 49) bestimmt, $\tilde{\alpha}$ errechnet sich mit dem erweiterten Bewegungsmodell aus Gleichung (6.1).

Die genaue Lage des Profils ist unbekannt und wird mit Variation von (x_{c0}, z_{c0}) auf \tilde{R}_c geschätzt. Es ist lediglich bekannt, dass \tilde{R}_c senkrecht zur z -Achse ist. Auf \tilde{R}_c werden nun mit Gleichung (6.2) die Punkte $\tilde{P}_c(\tilde{x}, \tilde{z}_c)$ an der zuvor berechneten imaginären Stelle \tilde{x} ermittelt. Der resultierende Fehler Δz wird nun durch die Differenz zwischen \tilde{z}_c und \tilde{z} gebildet. Durch Annäherung von $\tilde{\mathbf{p}}$ an die wahren Werte fallen letztendlich die Profilverläufe \tilde{R} und \tilde{R}_c in R zusammen.

Das nichtlineare Minimierungsproblem lautet bei n Messungen also wie folgt:

$$\mathbf{p}_{\text{opt}} = \arg \min_{\mathbf{p}} \sum_{i=1}^n \left(\frac{(\tilde{z}_c - \tilde{z})^2}{\tilde{z}^2} \right). \quad (6.4)$$

Es wird die Summe der Fehlerquadrate in z -Richtung durch Variation des Parametersatzes \mathbf{p} minimiert. Die Fehlerquadrate sind mit \tilde{z}^{-2} gewichtet, da z in den Entfernungsfehler aus Gleichung (3.4) quadratisch eingeht. Die Minimierung wird mittels des ableitungsfreien Nelder-Mead Simplex Algorithmus⁵ durchgeführt. Aufgrund der periodischen Funktionen müssen dem Algorithmus gute Startwerte übermittelt werden, damit er zum gewünschten Ergebnis konvergiert. Dies erwies sich in der Praxis durch das relativ grobe Tiefenrelief als problemlos.

6.2.3 Durchführung einer Kalibrierung

Zur Kalibrierung des *VR-SCAN* wurde der Lineartisch mit dem Profil in drei Entfernungen gescannt (vgl. Abbildung 6.3a). Dabei wurde das gesamte Messfeld des Scanners abgedeckt. Pro Scan wurden 1024 Punkte aufgenommen, was gut sieben Schwingungsperioden des Spiegels entspricht. Es wurden nur Messdaten mit als fehlerfrei gekennzeichnetem Peak verwendet. Punkte, deren Konfidenz K_M nach Gleichung (2.2) (vgl. Abschnitt 2.3.1) unter einem gewissen Schwellwert lag, wurden ebenfalls ausgefiltert. Der Fokus wurde auf die jeweils mittlere Entfernung eingestellt.

⁵Genutzt wurde die Funktion `fminsearch()` in MATLAB (www.mathworks.com)

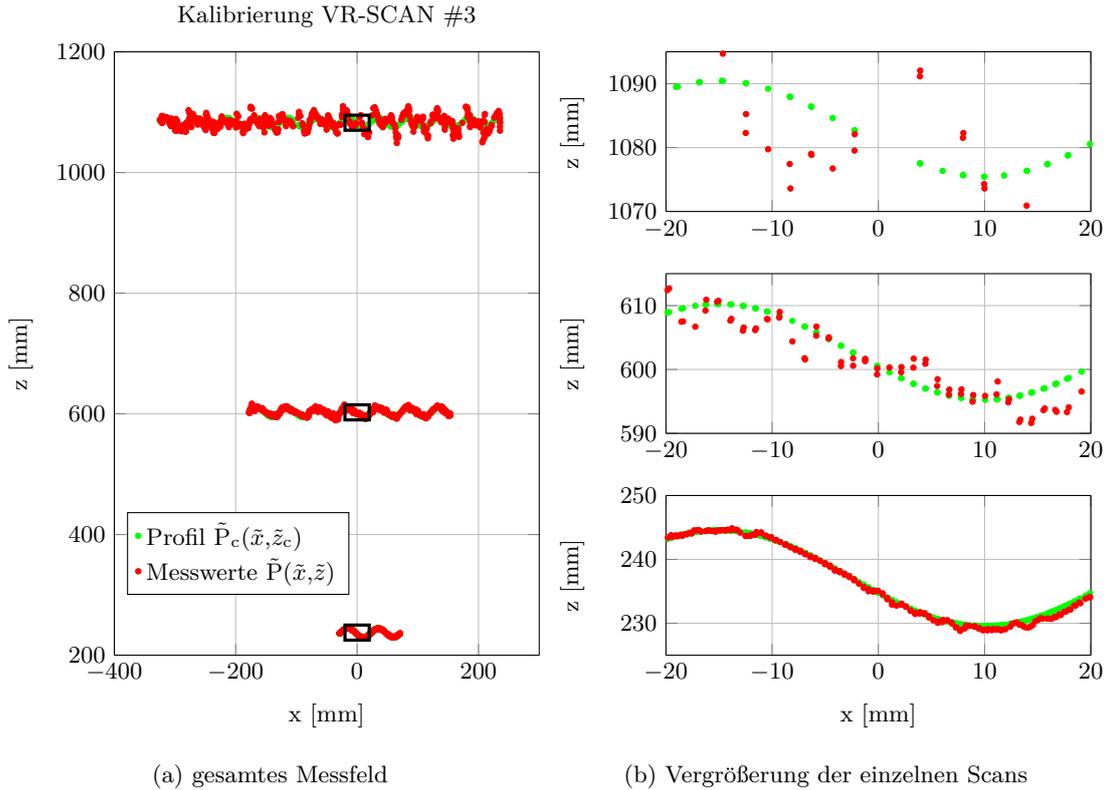


Abbildung 6.3: Kalibrierung des *VR-SCAN* mit bekanntem sinusförmigen Tiefenprofil

Abbildung 6.3b zeigt vergrößerte Ausschnitte aus den drei Scans. Dargestellt sind die Messdaten, nachdem das Modell mit dem optimierten Parametersatz \mathbf{p}_{opt} angewendet wurde, als rote Punkte. Diese entsprechen den Punkten $\tilde{P}(\tilde{x}, \tilde{z})$ aus Abbildung 6.2 rechts. Die grünen Punkte repräsentieren die geschätzten Positionen des bekannten sinusförmigen Tiefenprofils $\tilde{P}_c(\tilde{x}, \tilde{z}_c)$. Das auf die Messdaten angewendete Modell passt gut zur Realität. Das Minimierungsproblem aus Gleichung (6.4) konvergierte augenscheinlich im globalen Minimum.

Das Bestimmtheitsmaß R^2 gibt Auskunft über die Güte eines linearen Regressionsmodells. Zur Bestimmung von R^2 wird, wie auch in der Kalibrierung, lediglich die z -Koordinate betrachtet. Durch Verwendung des sinusförmigen Tiefenprofils würden die Messwerte in x -Richtung Residuen in gleicher Größenordnung hervorrufen. Das Bestimmtheitsmaß ist definiert durch

$$R^2 = 1 - \frac{QSR}{QST},$$

mit der Quadratsumme der Residuen QSR und QST als der Quadratsumme der totalen Abweichung aller Messwerte vom Mittelwert. Es kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen.

Je höher R^2 ist, desto höher ist die Modellgüte. Betrachtet man den Messwert z als die abhängige Variable und die Kalibrierprofilentfernung z_c als die Regression, so ist $z - z_c$ das Residuum eines Messwertes in z -Richtung. Der Abstand des Messwertes vom Mittelwert \bar{z} ist $z - \bar{z}$. Für alle n Messwerte gilt demnach

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (z_i - z_{c,i})^2}{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2} . \quad (6.5)$$

Aus dem Datensatz der Kalibrierung ergibt sich der Wert $R^2 = 0,9998$. Dies lässt auf eine hohe Anpassungsgüte des Modells schließen.

Man kann in Abbildung 6.3b die erreichbare Messgenauigkeit gut ablesen: Sie ist im Nahbereich deutlich höher als im Fernbereich. Insgesamt konnte die geforderte Präzision von 1 mm in 1000 mm Entfernung nicht erreicht werden. Die Messunsicherheit, angegeben als Standardabweichung σ_z der Fehler in z -Richtung, beträgt 9,2 mm in 1080 mm Entfernung, 2,5 mm in mittlerer Entfernung und 0,5 mm bei $z = 235$ mm. Im Nahbereich ist der Fehler also etwa fünfmal so groß, wie in Tabelle 5.1 gefordert, im Fernbereich beträgt der Faktor bereits fast 10.

Die Gründe für die geringere Genauigkeit sind vielfältig. Eine Diskussion der Fehlerquellen findet im folgenden Abschnitt statt.

6.3 Systematische Fehlereinflüsse

Aktive Lasertriangulation unterliegt einer Vielzahl an systematischen Fehlereinflüssen. In der Literatur [4, 9, 21, 68] werden diese eingehend analysiert. In den folgenden Abschnitten werden die wichtigsten systematischen Fehlerquellen mit Einfluss auf den *VR-SCAN* diskutiert: Der folgende Abschnitt behandelt Laser Speckle, in Abschnitt 6.3.2 werden die Fehlereinflüsse auf die Bildverarbeitung eines Triangulationssensors beschrieben. Der Scanner birgt weitere Fehlerquellen (Abschnitt 6.3.3). In den Schlussfolgerungen in Abschnitt 6.3.4 werden die Einflüsse der diskutierten Fehlerquellen gegeneinander gewichtet.

6.3.1 Laser Speckle

Laser Speckle ist eine Interferenzerscheinung des Laserlichts, die bei Reflexion von optisch rauen Oberflächen entsteht. Die Rauigkeit liegt dabei in der Größenordnung der Laserwellenlänge. Wahrgenommen wird Laser Speckle als ortsfestes körniges Rauschen, siehe Abbildung 6.4: Mit einer Fotokamera wurde ein auf eine Papieroberfläche projizierter Laserpunkt aufgenommen. Die Aufnahme wurde bewusst defokussiert, um das

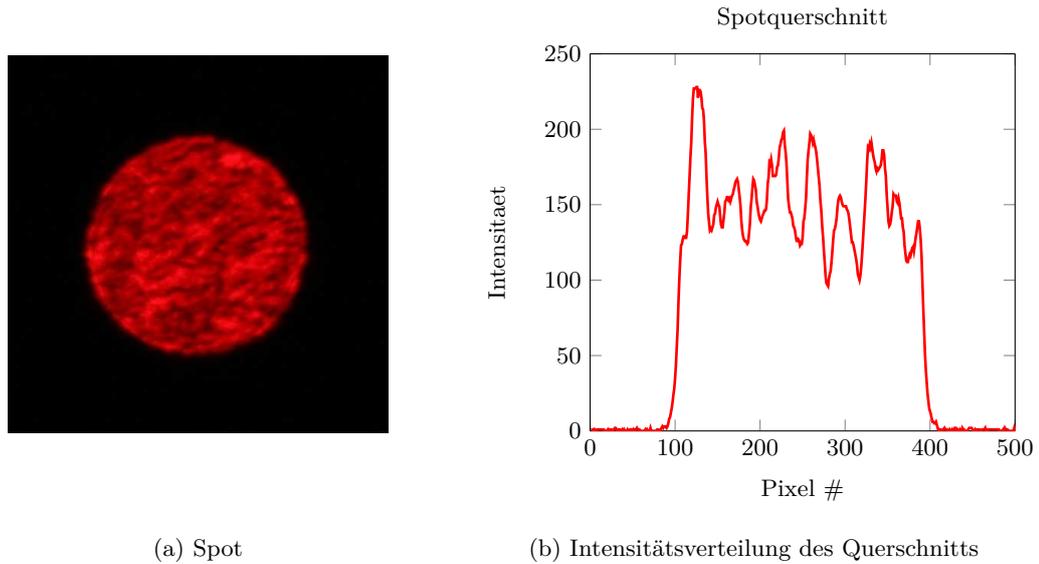


Abbildung 6.4: Laser Speckle (Unschärfes Bild eines Laserspots aufgenommen mit einer Canon EOS1)

Specklemuster deutlich erkennbar zu machen. Die Intensitätsverteilung des Querschnitts zeigt starkes Amplitudenrauschen als Auswirkung.

In der Literatur wird Speckle als eine Hauptfehlerquelle für aktive Lasertriangulation angesehen [9, 12, 33, 36, 68, 108]. Nach Dorsch u. a. [33] beträgt die Unsicherheit der Entfernungsmessung mit einem Lasertriangulator aufgrund Laser-Speckle

$$\Delta z = \frac{C}{2\pi} \frac{\lambda}{A_n \sin \beta}, \quad (6.6)$$

mit dem Speckle-Kontrast C , der Wellenlänge des Lasers λ , der numerischen Apertur der Empfangsoptik A_n und dem Triangulationswinkel β . Bei kohärenter Beleuchtung gilt $C = 1$. Mit für den *VR-SCAN* typischen Werten $\lambda = 658 \text{ nm}$, sowie $A_n = 16 \cdot 10^{-3}$ und $\beta = 0,24 \text{ rad}$ für den Nahbereich bei $z = 250 \text{ mm}$ gilt $\Delta z = 28 \mu\text{m}$.

Baribeau und Rioux kamen ebenfalls auf einen vergleichbaren Zusammenhang [9]. Mit den gleichen Beispielwerten beträgt der Fehler $34 \mu\text{m}$ in z -Richtung und liegt damit in der gleichen Größenordnung.

Die berechneten Werte wurden durch ein Experiment überprüft. Dazu wurde bei stillstehendem Scannerspiegel in naher Entfernung ein weißes Blatt Papier mit einem Laser beleuchtet. Die Position p des abgebildeten Peaks wurde ermittelt, während das Blatt unter konstantem Abstand z seitlich bewegt wurde. Abbildung 6.5 zeigt das Ergebnis: Links sind beispielhaft drei einzelne Peaks zu sehen, wie sie durch das Laserlicht auf dem Detektor erzeugt wurden (Abbildung 6.5a). Man erkennt deutlich das durch Speckles verursachte starke Rauschen. Die jeweiligen berechneten Peakpositionen p sind durch

6 Kalibrierung und Ergebnisse

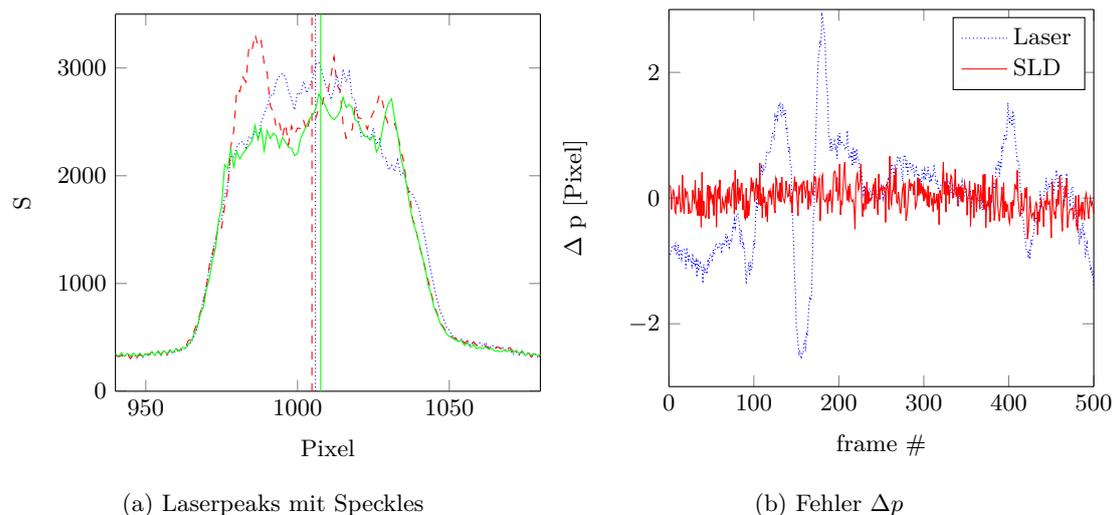


Abbildung 6.5: Messfehler Δp aufgrund Speckles: Vergleich Laser - SLD

vertikale Linien markiert. Abbildung 6.5b zeigt den zeitlichen Verlauf des Messfehlers Δp in Bezug auf den Mittelwert in Pixeln. Bei Laserlicht ist der Verlauf mit mehr als ± 2 Pixel entsprechend verrauscht. Der Fehler entspricht in naher Entfernung (250 mm) nach Gleichung (3.4) maximal $\pm 580 \mu\text{m}$. Die Standardabweichung beträgt $\sigma_z = 250 \mu\text{m}$.

Zum Vergleich wurde der Versuch mit einer Superluminiszenzdiode (SLD) wiederholt. SLD sind breitbandige Lichtquellen mit ansonsten laserähnlichen Eigenschaften. Durch die verringerte Kohärenz sind die Speckles deutlich abgeschwächt. In Abbildung 6.5b ist der Fehlerverlauf im Vergleich zum Experiment mit Laser ersichtlich. Er ist mit maximal $\pm 0,5$ Pixel deutlich geringer. Umgerechnet in z -Richtung beträgt der Fehler maximal $\pm 0,15 \text{ mm}$, davon ist die Standardabweichung $\sigma_z = 65 \mu\text{m}$.

Es fällt auf, dass die Fehler aus dem Versuch deutlich über dem berechneten Fehler nach Gleichung (6.6) liegen, selbst bei der SLD. Der Grund dafür liegt in der unscharfen Abbildung: Der Peak in Abbildung 6.5a ist ca. 100 Pixel breit (0,7 mm), er ist also stark defokussiert. Scharf abgebildet würde der Spot mit Durchmesser 1 mm gemäß des Abbildungsmaßstabes bei $z=250 \text{ mm}$ einen Peak von 0,1 mm Breite erzeugen (Gleichungen (A.1), (A.2)). Der defokussierte Peak in Abbildung 6.5a ist also ungefähr um den Faktor 7 gegenüber einer scharfen Abbildung vergrößert. Die Speckles verschwinden nicht durch die Unschärfe, sondern werden lediglich vergrößert. Als Folge der Defokussierung ist daher das Specklerauschen wie der gesamte Peak ebenfalls um den Faktor 7 vergrößert abgebildet, und hat somit entsprechend größeren Einfluss auf den Messfehler. Wendet man diesen Faktor auf den gemessenen Fehler an, so wird $\sigma_z/7 = 250 \mu\text{m}/7 = 36 \mu\text{m}$ fast exakt so groß wie die oben angegebene theoretische Messunsicherheit nach Baribeau und Rioux von $34 \mu\text{m}$.

Speckles können nicht zeitlich ausgemittelt werden, da sie als geometrische Größe ortsfest sind. Mögliche Strategien zur Abschwächung des Effektes sind:

- Verwendung einer breitbandigen Lichtquelle, wie gezeigt.
- örtliche Ausmittlung durch große Pixel [4].
- Bewegung des Lasers: Durch die Bewegungsunschärfe entsteht eine örtliche Mittelung der Speckles.

Insbesondere der letzte Punkt ist bei einem Laserscanner inhärent, also auch beim *VR-SCAN*. Mit aktiver Ablenkung durch den MEMS Spiegel wird erwartet, dass der Specklefehler deutlich sinkt. Dieser Effekt wird auch in [12, 34, 108] erwähnt.

6.3.2 Triangulation

Die Gleichungen zur allgemeinen Triangulation mit den Fehlerfunktionen wurden in Abschnitt 3.1 hergeleitet. Die Entfernung z wird demnach über die Ermittlung der Messgröße p auf dem Kamerachip berechnet. Zu diesem Zweck muss die Position des Abbilds des auf das Objekt projizierten Laserpunktes ermittelt werden (siehe Abschnitt 5.2.11). Fehler bei der Peak Prozessierung gehen nach Gleichung (3.4) mit dem Quadrat der Entfernung z in den Entfernungsmessfehler Δz ein. Bei der Bestimmung von p sind die folgenden Unsicherheiten möglich:

Lokale Unterschiede in der Reflektivität und Form

Abbildung 6.6a verdeutlicht die Situation bei lokalen Reflektivitätsübergängen: Das Gauss-verteilte Intensitätsprofil des Laserstrahls wird beim Überstreichen der Übergänge unterschiedlich stark reflektiert, wodurch sich der Peak auf dem Detektor verformt, wie dargestellt. Die Signalstärke S sinkt bei schwächerer Reflexion. Die detektierte Peakposition p' unterscheidet sich daraufhin von der wahren Position p um Δp . Es entstehen die oben abgebildeten, charakteristischen Ausschläge im Verlauf von p' .

Ähnliche Auswirkungen haben lokale Formänderungen des Objektes, wie Kanten oder Krümmungen. Abbildung 6.6b zeigt beispielhaft das Auftreffen des Lasers auf eine Kante: Der Peak wird je nach Kantenwinkel und -position verformt, was analog zu oben zu einem Messfehler Δp führt. Bei Abschattungen des Lasers oder der Kamera sind die Effekte entsprechend.

Der Fehler wächst mit dem Kontrast an der Diskontinuität und mit der Breite des Peaks. Große Peakbreite entsteht zum Einen durch einen breiten Laserstrahl, und zum Anderen auch durch zunehmende Unschärfe der Abbildung.

Zur Minimierung des Fehlers führt im Umkehrschluss gute Fokussierung sowohl des Projektors als auch der Kamera. Mit der sogenannten *spacetime analysis* wird von Curless

6 Kalibrierung und Ergebnisse

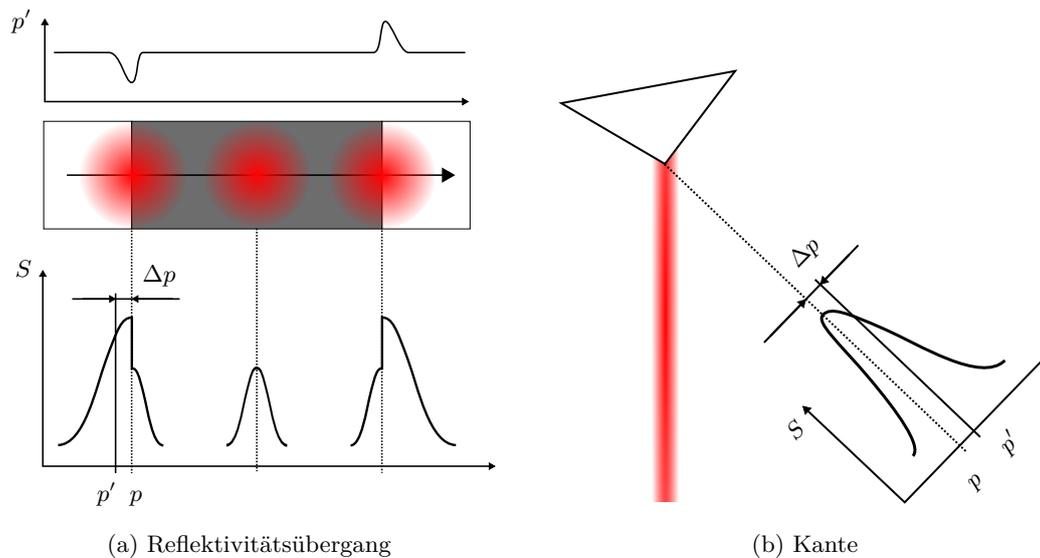


Abbildung 6.6: Messfehler bei der Triangulation aufgrund von lokalen Unterschieden in Reflektivität und Form

[28] ein Ansatz zur weiteren Fehlerreduzierung vorgestellt. Darin wird der zeitliche Verlauf der Intensität zusammen mit dem örtlichen Verlauf analysiert. Auf diese Weise können die Orte der lokalen Diskontinuitäten in Abbildung 6.6 bestimmt werden. Dieses Vorgehen ist im *VR-SCAN* bislang nicht implementiert.

Abbildungsfehler der Linse

Bei der optischen Abbildung durch sphärische Linsen entstehen eine Reihe von Abbildungsfehlern. Das Triplet-Objektiv des *VR-SCAN* kompensiert die Abbildungsfehler Bildfeldwölbung, Koma, Astigmatismus und Öffnungsfehler weitgehend, wie in Abschnitt 5.2.8 beschrieben. Die Korrektur der Fehler bezieht sich jedoch auf die Schärfenebene. Davor oder dahinter im unscharfen Bereich kann jedoch nicht davon ausgegangen werden, dass das Strahlenbündel die Intensitätsverteilung des Laserpunktes korrekt widerspiegelt. Die Folge davon ist eine Verzerrung des Peaks, die bei achsfernem Lichteinfall asymmetrisch werden kann. Daraus resultiert wiederum ein Messfehler Δp .

Die mechanische Konstruktion der Linsenfassung und die Montage der Linsen erfolgte in Eigenregie. Dadurch können Achsfehler und Verkippungen der Linsen zueinander nicht vollständig ausgeschlossen werden. Es wird vermutet, dass in den resultierenden Abbildungsfehlern ebenfalls eine nicht unerhebliche Fehlerquelle liegt.

Projektorqualität

Der Projektor soll einen möglichst kleinen Laserpunkt über die gesamte Messfeldtiefe garantieren. Dennoch ist eine gewisse Divergenz unvermeidlich, und der projizierte Messpunkt nicht unendlich klein. Die Räumliche Auflösung ist dadurch begrenzt (vgl. Abschnitt 5.2.9), und es können aufgrund lokaler Unterschiede der Oberfläche Fehler entstehen, wie oben beschrieben.

Unscharfe Abbildung

Aufgrund der begrenzten Schärfentiefe des *VR-SCAN* Objektivs (vgl. Anhang A.2) befinden sich relativ große Bereiche des Messfeldes außerhalb der Fokussierung. Grundsätzlich sind auch bei unscharfer Abbildung Messungen möglich, da die Peak Prozessierung unabhängig von der Peakbreite funktioniert. Da durch Unschärfe alle oben beschriebenen Fehler zusammen mit den veränderten Peaks auf dem Detektor vergrößert abgebildet werden, wächst folglich der Fehler Δp entsprechend.

In der Arbeit von Seitz und Tiziani [85] wird die ungleichmäßige Bestrahlung der Eintrittspupille und die Auswirkungen auf Triangulationssensoren bei unscharfer Abbildung untersucht. Nach den Autoren ist der Positionsfehler Δp linear von der (geringen) Unschärfe abhängig. Im Abschnitt 6.3.1 wird der Effekt am Beispiel des Speckle-Rauschens bestätigt.

Fazit

Die unscharfe Abbildung ist die dominante Fehlerquelle des *VR-SCAN*. Sie verstärkt alle anderen Fehlereinflüsse wie Speckles und Abbildungsfehler der Optik. Dies ist der geometrischen und optischen Auslegung geschuldet, die eine verhältnismäßig große Messtiefe bei gleichzeitig großem Öffnungswinkel zum Ziel hatte. Falls hohe Genauigkeit erforderlich ist, muss also insbesondere auf korrekte Fokussierung geachtet werden.

6.3.3 Scanner

Die bei der Ablenkung des Lichts durch den Scanner in Richtung α entstehenden Fehler wirken sich in z -Richtung wie in Gleichung (3.6) angegeben aus. Die Auswirkungen sind vergleichbar mit den Messfehlern der Größe p .

Folgende Effekte haben Einfluss auf die Genauigkeit der Scanwinkelmessung:

- Die Genauigkeit des verwendeten Bewegungsmodells zur Scanwinkelschätzung ist durch die Anzahl der harmonischen Oberwellen begrenzt.

- Die Geschwindigkeit des wandernden Laserpunktes v_m ist nach Gleichung (5.23) nicht konstant. Die aus der Bewegungsunschärfe resultierende Verbreiterung des Peaks ist proportional zur Geschwindigkeit, also in Folge ebenfalls nicht konstant. Infolgedessen ist auch der Phasenoffset $\hat{\varphi}_{\text{off}}$ variabel, der jedoch in der erweiterten Modellierung in Gleichung (6.1) als konstant angenommen ist. Dieser Effekt wirkt sich als Verzerrung bei großen Scanwinkeln aus. Durch das Ausschließen der (langsamen) Umkehrpunkte der Schwingung von der Auswertung im Zuge der Laserklassifizierung (siehe Anhang C) wird der Fehler abgemildert und v_m ist annähernd linearisiert. Weitere Verbesserung wäre nur durch die korrekte Berücksichtigung der Bewegungsunschärfe in einem komplexeren Modell möglich.
- Schwankungen der Umgebungstemperatur und Luftfeuchtigkeit führen, wie in Abschnitt 5.2.2 beschrieben, zu Resonanzverschiebung. Durch die Konstantregelung von Phase und Amplitude wird angenommen, dass das Bewegungsmodell (5.12) dennoch gültig bleibt. Dies ist allerdings nur näherungsweise der Fall. Es sind in Praxis geringe Abweichungen vom fest kalibrierten und als konstant angenommenen Parametersatz zu erwarten.
- Theoretisch können nur rotatorische Erschütterungen Einfluss auf α nehmen, da der MEMS Spiegel lediglich um eine Achse rotiert. In der Praxis wird er jedoch auch durch translatorische Stöße in mehreren Moden angeregt [82], da die Biegesteifigkeit der Torsionsgelenke begrenzt ist. Hochfrequente Störungen sind durch die starke Unterabtastung durch die Indexmarke generell kaum zu detektieren. Die Stöße regen das System jedoch zu Schwingungen an, und deren Auswirkungen auf die Phase und Amplitude der Grundschwingung sind messbar.

Durch die Regelabweichung der Phasen- und Amplitudenregelung können die Stöße folglich detektiert, und als Qualitätswerte der Scanwinkelmessung zur Filterung der Messwerte ausgegeben werden.

Beim *VR-SCAN* sind Scanwinkelfehler besonders bei hochfrequenten Fehlereinflüssen zu erwarten. Durch die mit $2f$ niedrige Abtastrate der Indexmarke können diese Fehler nicht direkt gemessen werden. Als mögliche Fehlerquelle ist neben den erwähnten mechanischen Erschütterungen auch die Temperaturveränderung durch die punktweise Modulation der Laserleistung hervorzuheben: Die Frequenz der Modulation ist schritthaltend mit der Messrate und damit deutlich höher als die Abtastrate der Indexmarke. Die Reaktion des MEMS Spiegels konnte bisher nicht direkt vermessen werden. Aus der raschen Auswirkung auf die Schwingungsamplitude (vgl. Abbildung 5.6b) wird allerdings gefolgert, dass durch hochfrequente Lasermodulation Störungen erzeugbar sind, die mit der momentanen Implementierung nicht detektierbar sind.

6.3.4 Schlussfolgerungen

Bei der Triangulation dominiert eine Kombination aus Abbildungsfehlern der selbstgebauten Optik in Verbindung mit der nicht immer perfekten Fokussierung. Der fundamen-

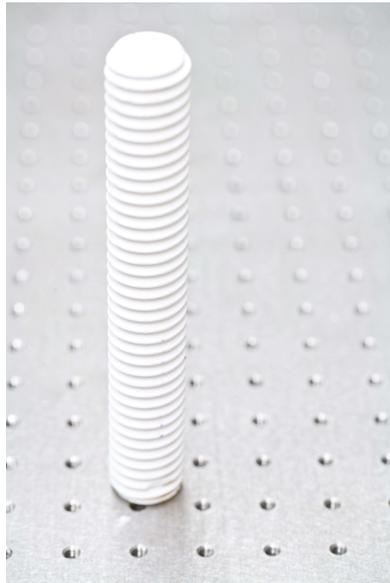


Abbildung 6.7: Gewindebolzen (Länge 200 mm, Steigung 5 mm)

tale Einfluss von Laserspeckles auf die Messunsicherheit konnte durch ein Experiment bestätigt werden. Die resultierende Messunsicherheit folgt den in der Literatur genannten Zusammenhängen und ist zunächst gering. Durch Defokussierung steigt der Messfehler jedoch linear mit dem Durchmesser des Unschärfekreises und wird dadurch signifikant.

Der Scanner ist in erster Linie gegenüber hochfrequenten Störungen empfindlich. Inwieweit Motor- und Getriebevibrationen relevant sind, wie sie z. B. an bei einem Roboter auftreten können, muss noch evaluiert werden.

6.4 Verifikation

Anhand zweier Beispiele wird in diesem Abschnitt der praktische Einsatz des *VR-SCAN* präsentiert.

6.4.1 Gewindestange

Abbildung 6.8 zeigt die Vermessung eines Gewindebolzens mit 200 mm Länge und einer Gewindesteigung von 5 mm. Der Bolzen (Abbildung 6.7) wurde mit Entwicklerspray behandelt und unter verschiedenen Winkeln in unterschiedlichen Entfernungen gescannt. Der Fokus der Linse wurde auf die jeweilige Entfernung eingestellt und die Achse des Bolzens lag in der Scanebene. Abbildung 6.8a zeigt die einzelnen Scans, Abbildung 6.8b Detailvergrößerungen: In jeder Entfernung ist die Steigung des Gewindes gut ablesbar.

6 Kalibrierung und Ergebnisse

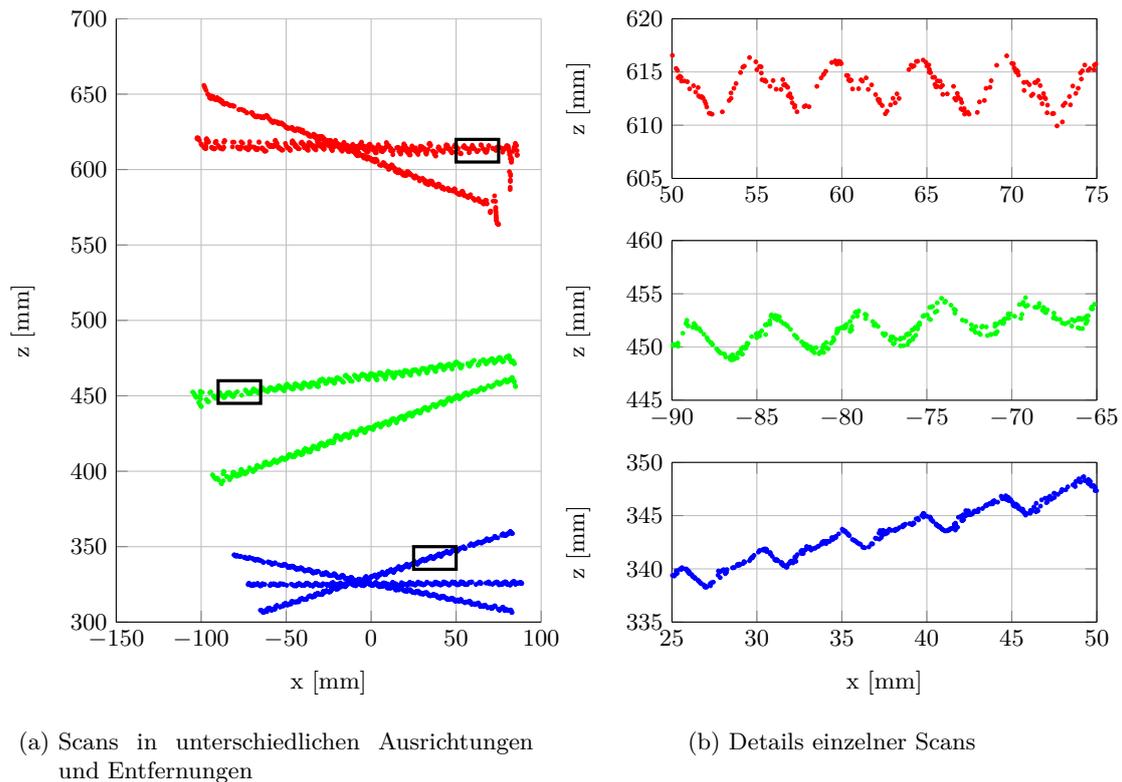


Abbildung 6.8: Vermessung eines Gewindebolzens

Die Ausschnitte zeigen darüber hinaus Artefakte wie Asymmetrie und eine leichte Hysterese in der mittleren Vergrößerung in Abbildung 6.8b: Letztere ist die Folge zeitlicher Ungenauigkeit bei der Scanwinkelschätzung oder Indexmarkenmessung, die Asymmetrie wird durch die unterschiedlichen Neigungen der Oberfläche zum Laserstrahl erklärt.

6.4.2 Büste

Indem der *VR-SCAN* relativ zum Weltkoordinatensystem bewegt wird, kann eine 3D-Punktwolke von statischen Objekten aufgenommen werden. Dabei muss die externe Bewegung des Scanners zeitlich synchron zum 2D-Scan des Sensors erfolgen. Die intern gemessenen (x,z) -Koordinaten werden so in das dreidimensionale Welt-KS überführt.

Abbildung 6.9 zeigt die Punktwolke eines Scans einer Büste. Der *VR-SCAN* war dazu auf dem Lineartisch montiert, der zur Kalibrierung verwendet wird (vgl. Abschnitt 6.1). Die Linearachse war senkrecht zur Scanebene in x -Richtung des Scanner-KS ausgerichtet und der Lineartisch wurde während der Messung von Hand bewegt. Durch die Synchronisierung der Messungen von Lineartisch und *VR-SCAN* wurden eine 3D-Punktwolke in (x,y,z) -Koordinaten erzeugt.

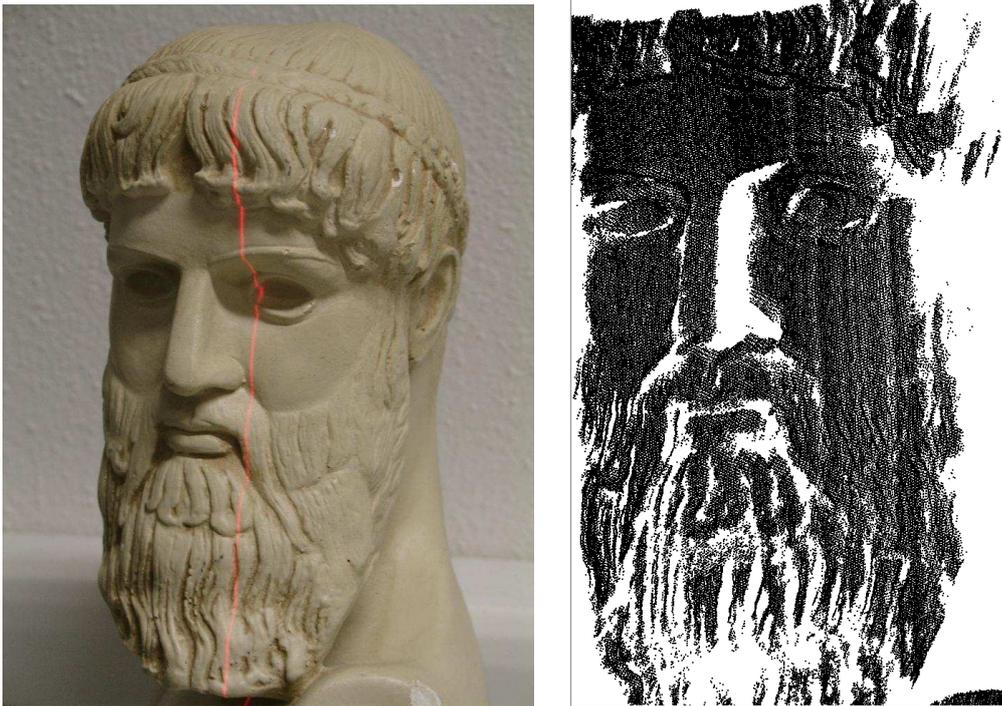


Abbildung 6.9: Vermessung einer Büste, Punktelwolke

6.5 Ergebnisse

Der *VR-SCAN* konnte mit einem effektiven Verfahren erfolgreich kalibriert werden. Die Residuen der Kalibrierung und die Ergebnisse der Experimente zeigen die Leistungsfähigkeit des *VR-SCAN*. Die Anforderungen in Tabelle 5.1 konnten großenteils erfüllt werden. Die technischen Daten des *VR-SCAN* sind in Tabelle 6.2 zusammengefasst.

Abstriche müssen bei der Messunsicherheit gemacht werden: Die Genauigkeit ist zwar im Nahbereich deutlich höher als im Fernbereich, jedoch konnte die geforderte Präzision nicht erreicht werden. Erreicht werden in 1000 mm Entfernung $\sigma_z = 9$ mm (gefordert: 1 mm). Im Nahbereich ist der Sensor mit $\sigma_z = 0,5$ mm etwas näher an der Anforderung von 0,1 mm. Auch die maximal spezifizierte Abmessung von 100 mm wurde mit 125 mm knapp verfehlt.

Die geringere Genauigkeit ist dem Hauptziel der Entwicklung geschuldet: Priorität haben eine große Messtiefe mit großem Empfangswinkel bei gleichzeitig kleinen Abmessungen. Die Folge davon ist die kompakte Auslegung mit relativ geringem Basisabstand und kurzer Brennweite, was nach Gleichung (3.11) zu Lasten der Messpräzision in z -Richtung geht (vgl. Abschnitt 3.1).

Tabelle 6.2: Technische Daten des *VR-SCAN*

Messbereich in z -Richtung	250 - 1000	mm	
Messtiefe	750	mm	mit Fokussierung
Messbreite in x -Richtung	140 - 570	mm	
Empfangswinkel	30	°	
mittlere Winkelauflösung	10	mrad	nativ
	0,625	mrad	interlaced
Messpunktabstand in x -Richtung	1,3 - 5,2	mm	nativ
	0,08 - 0,33	mm	interlaced
Datenrate	38	kHz	maximal
Messunsicherheit 1σ	9	mm	bei $z = 1000$ mm
	0,5	mm	bei $z = 250$ mm
Abmessungen	125x67x68	mm	Länge x Breite x Höhe
Gewicht	428	g	komplett mit Gehäuse
Laserklasse	2		

6.5.1 Robustheit

Die Robustheit-Hypothese aus Abschnitt 2.3.1 wird erfüllt: Der Sensor ist aktiv und moduliert punktweise seine Sendeleistung. Durch Regelung auf maximale Signalstärke am Detektor wird stets maximale Konfidenz K_M der Messung nach Gleichung (2.2) angestrebt bei gleichzeitiger Vermeidung von Sättigung. Je nach Anwendung und deren Anforderung an die Konfidenz können die Messwerte durch die Höhe des Schwellwertes so gefiltert werden, dass falsch positive Ergebnisse nahezu ausgeschlossen werden können.

Durch die Regelung auf maximale Signalstärke und den variablen Fokus wird auch die Freiraummessung ermöglicht: Die Laserleistung wird stets maximal geregelt, wenn kein Messwert empfangen wird. Dadurch ist die Konfidenz K_{frei} nach den Gleichung (5.35) im fokussierten Abstand maximiert. Der gesamte Messbereich kann somit durch Variation des Fokus förmlich „abgetastet“ werden (vgl. Abschnitt 5.2.12 mit Abbildung 5.14b).

6.5.2 Vielseitigkeit

Zur Überprüfung der Hypothese zur Vielseitigkeit aus Abschnitt 2.3.2 betrachte man die Anforderungen aus den Tabellen 2.4 und 2.5. Mit einer Reichweite von über 1000 mm, der Freiraumkonfidenzbewertung, sowie der hohen Datenrate von fast 40 kHz eignet sich der Sensor gut für effektive Exploration. Im Nahbereich erreicht er seine höchste Genauigkeit und dient so als Modellierer. Durch die Möglichkeit der Fokussierung wird der spezifizierte Messbereich mit seiner großen Messtiefe problemlos abgedeckt.

Mit den geringen Abmessungen und niedrigem Gewicht wird eine Hauptvoraussetzung für den Einsatz als Hand-Auge Sensor erfüllt. Das Gehäuse ist gut greifbar, durch Tasten und Statusleuchten bedienbar und somit für menschliche Bedienung geeignet.

7 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde die Entwicklung eines aktiven Triangulationsscanners beschrieben. Der Laserscanner *VR-SCAN* erfüllt die aufgestellten Hypothesen zu Vielseitigkeit und Robustheit für das Szenario „autonome 3D-Modellierung und Exploration mit einem Roboterarm“. In diesem Kapitel wird die Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf die Weiterentwicklung gegeben.

7.1 Zusammenfassung

Die optische Wahrnehmung soll dem Roboter ermöglichen, eine Vielzahl von Aufgaben zu erfüllen und sein Autonomielevel zu steigern. Es gibt eine unüberschaubar große Anzahl von Anwendungen in der Perzeption: 3D-Modellierung, Exploration, Objekterkennung, Hinderniserkennung und visual Servoing seien als Beispiele genannt. Ein einzelner Sensor kann die weit gefächerten und teilweise widersprüchlichen Anforderungen der genannten Applikationen kaum erfüllen.

Die Perzeption muss daher sehr vielseitig sein. Vielseitigkeit ist auf zwei Arten zu erreichen: Der Einsatz mehrerer, spezialisierter Sensoren in einem Multisensorsystem kombiniert die Stärken unterschiedlicher Systeme miteinander. Dieser Ansatz ist jedoch begrenzt: Die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten und die Beweglichkeit eines Leichtbauroboters sollen durch Komplexität, Größe und Gewicht eines Multisensorsystems nicht eingeschränkt werden. In dieser Arbeit wurde daher die Strategie verfolgt, einen inhärent vielseitigen Sensor für ein klar abgegrenztes Szenario zu entwickeln: Der *VR-SCAN* für die autonome 3D-Modellierung und Exploration an einem Leichtbauroboterarm.

Die zunehmende Autonomie in der Robotik erfordert zudem robuste Perzeption, die unter unvorhergesehenen und veränderlichen Umweltbedingungen zuverlässig funktioniert. Der Roboter soll, unter Ausschluss der Gefährdung von Umwelt und ihm selbst, die gestellten Aufgaben erledigen.

Die Anforderungen von autonomer Modellierung und Exploration an den Sensor wurden analysiert und daraus zwei Hypothesen zu Vielseitigkeit und Robustheit abgeleitet. Ein robuster Sensor muss demnach aktiv sein, seine Sendeleistung modulieren und die Konfidenz der Messwerte bewerten. Vielseitigkeit wird durch Zusammenführung der gegensätzlichen Anforderungen von Modellierung und Exploration an Messtiefe und Genauigkeit erreicht. Gleichzeitig soll der Sensor neben dem Einsatz am Roboter auch

handgeführt betrieben werden können. Eine kleine und leichte Konstruktion ist dafür Voraussetzung.

Nach Ermittlung des Stands der Technik wurden, mit Hilfe einer Bedarfsanalyse unter Anwendern von Perzeptionssensorik am Institut RM des DLR, die Konstruktionsziele definiert. Laut den Anforderungen an einen neuartigen Sensor sollte der *VR-SCAN* ein aktiver Laserscanner nach dem Triangulationsprinzip sein. Seine Vielseitigkeit ist durch eine große Messtiefe, variable Genauigkeit und variable Fokussierung sichergestellt. Durch variable Befestigungsmöglichkeiten sowie Tasten und Anzeigen werden seine Einsatzmöglichkeiten sinnvoll erweitert. Robustheit gegenüber falschen Messergebnissen erlangt der Sensor durch die Bewertung jedes Messwertes mit einer Konfidenz. Dadurch werden auch Freiraummessungen ermöglicht.

Die Konstruktion des *VR-SCAN* erreicht durch Verwendung und Entwicklung sehr kleiner Komponenten eine hohe Integrationsdichte. Mit einem MEMS Mikrospiegel und einer fasergekoppelten Laserdiode konnte eine extrem kompakte Scannereinheit verwirklicht werden, die gleichzeitig hohe Präzision bei der Lichtablenkung liefert. Ein Mikromotor und ein kompaktes, nach Vorgabe gefertigtes Dreilinsenobjektiv, bilden zusammen mit einem hochauflösenden und rauscharmen CMOS Sensor die fokussierbare Zeilenkamera. Ein zentrales FPGA stellt das Herzstück des Systems dar, in dem alle Komponenten miteinander verbunden und synchronisiert, sowie alle Berechnungen durchgeführt werden.

Durch ein patentiertes Kalibrierverfahren werden alle systembeschreibenden Parameter ermittelt. Die unabhängigen Systeme MEMS Scanner und Zeilenkamera werden dabei gemeinsam mittels eines verschiebbaren Tiefenreliefs kalibriert. Durch die Kalibrierung und in Experimenten konnte die Funktionsfähigkeit des Laserscanners erfolgreich gezeigt werden. Der *VR-SCAN* vereint die folgenden herausragenden Eigenschaften und erfüllt damit die aufgestellten Hypothesen als robuster und vielseitiger Perzeptionssensor für die Robotik:

- Große Messtiefe durch Autofokus
- Robustheit durch Konfidenzwerte
- Sehr kleine und leichte Bauform
- Hohe Genauigkeit im Nahbereich
- Flexibler Einsatz als Hand-Auge Sensor für Roboter und als handgeführter Sensor

7.2 Ausblick

Ein zentraler Aspekt bei der Entwicklung des *VR-SCAN* war es, einen Sensor zu konzipieren und zu bauen, der den Anforderungen autonomer Roboter entgegenkommt. Inwieweit dies gelungen ist, muss in der Praxis bewiesen werden. Insbesondere die mit

Konfidenzwerten gestützte Freiraummessung ist eine interessante Eigenschaft, die bisher kaum erforscht ist und verifiziert werden muss. Es wird in Zukunft daher in erster Linie um den praktischen Einsatz des *VR-SCAN* gehen. Ziel ist es, in der autonomen Exploration weitere Erfahrungen zu sammeln, die in die Weiterentwicklung der Sensorhardware einfließen können.

Bei der Entwicklung und ersten Versuchen kamen eine Vielzahl Ideen auf, wie der Sensor weiter verbessert werden könnte. Eine mögliche Weiterentwicklung würde diese aufgreifen: Durch eine verbesserte Empfangsoptik und die Verwendung einer breitbandigen Lichtquelle (SLD) könnte eine höhere Präzision erzielt werden. Die Entwicklung auf dem Gebiet der MEMS Mikrospiegel schreitet voran und es sind auch hier Verbesserungen zu erwarten, wie z. B. durch eine integrierte Scanwinkelmessung und -regelung.

Um hochintegrierte Sensoren wie den *VR-SCAN* zu verwirklichen, ist besonders die enge Zusammenarbeit zwischen Anwendern in Forschung und Industrie mit den Hardwareentwicklern notwendig. Gemeinsames Ziel ist es, die Perzeption und Autonomie in der Robotik vorantreiben.

A Optik

A.1 Grundlagen

In der achsnahen (gaußschen oder paraxialen) Optik gilt die gaußsche Linsenformel

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f'} \quad (\text{A.1})$$

mit der Gegenstandsweite a , Bildweite a' und der Brennweite f' .

Der Abbildungsmaßstab in Luft β' ist durch das Verhältnis von Bild- zu Objektweite definiert:

$$\beta' = \frac{a'}{a} \quad (\text{A.2})$$

Die Blendenzahl N ist über die Apertur D und der Brennweite f' definiert:

$$N = \frac{f'}{D} \quad (\text{A.3})$$

Die numerische Apertur A_n ist als

$$A_n = n \cdot \sin u \quad (\text{A.4})$$

mit der Brechzahl n (in Luft gilt $n = 1$) und dem Akzeptanzwinkel der Optik u (halber Öffnungswinkel) definiert.

Näherungsweise gilt der Zusammenhang

$$N \approx \frac{n}{2 A_n} . \quad (\text{A.5})$$

A.2 Schärfentiefe

Bei der optischen Abbildung ist aufgrund der Auflösungsgrenzen der Detektoren stets eine gewisse Unschärfe zulässig. Im Allgemeinen sind die Pixel deutlich größer als die wellenoptische Auflösungsgrenze, so auch beim *VR-SCAN*. Die Schärfentiefe kann dann mit den Formeln der geometrischen Optik berechnet werden. Beträgt der Durchmesser des Unschärfekreises auf dem Detektor u' , so ist die Abbildung eines Objektes durch

A Optik

eine Linse mit Brennweite f' und Blendenzahl N zwischen Nah- und Fernpunkt a_n und a_f scharf [71, S. 122-124]¹:

$$a_n = \frac{af'^2}{aNu' - f'Nu' + f'^2} \quad (\text{A.6})$$

$$a_f = \frac{af'^2}{f'Nu' - aNu' + f'^2} \quad (\text{A.7})$$

Wird a_f unendlich, indem der Nenner gegen Null geht, so ist die sogenannte hyperfokale Entfernung a_h mit unendlicher Schärfentiefe ab dem Nahpunkt erreicht:

$$a_h = \frac{f'^2}{u'N} + f' \quad (\text{A.8})$$

Mit (A.6) und (A.7) lässt sich die nötige Blende in Abhängigkeit der Schärfentiefe $\Delta a = a_f - a_n$ und des Nahpunktes a_n berechnen:

$$N = -\frac{\Delta a f'^2}{u'(\Delta a f' - 2\Delta a a_n + 2f'a_n - 2a_n^2)} \quad (\text{A.9})$$

A.3 Gauß-Strahl

Laserlicht breitet sich idealerweise in Form des Gauß-Strahles aus. Das transversale Profil des Strahles folgt dabei der Gauß-Kurve. Ein guter Laserstrahl schwingt nur in der Mode niedrigster Ordnung, der sogenannten TEM₀₀ Mode². Für diese Mode gilt nach [53] für den Strahlradius $w(z)$, an dem die Intensität auf $1/e^2$ gefallen ist:

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2}, \quad (\text{A.10})$$

mit der Rayleigh-Länge

$$z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda} \quad (\text{A.11})$$

und dem Radius der Strahltaile w_0 . Die halbe Divergenzwinkel θ im Fernfeld des (idealen) Strahles ist daher nur von λ und w_0 abhängig:

$$\theta = \frac{\lambda}{w_0\pi} \quad (\text{A.12})$$

¹Abweichend von der Quelle wird eine andere Vorzeichenvereinbarung verwendet, so dass die Bild- und Objektweite positiv notiert ist.

²transversalelektromagnetische Mode

Bei nicht idealen Strahlquellen sind sowohl w_0 als auch θ größer. Um diesen Umstand mittels dieser Zusammenhänge beschreiben zu können, wird die Strahlqualität K als Kehrwert der Beugungsmaßzahl M^2 eingeführt [35]:

$$K = 1/M^2 \quad (\text{A.13})$$

Definiert ist M^2 über das Verhältnis der Divergenz des Gauß-Strahls zu einem realen Strahl:

$$\theta_{\text{real}} = M^2 \theta = M^2 \frac{\lambda}{w_0 \pi} \quad (\text{A.14})$$

Es gilt stets $M^2 > 1$, wobei beim Gauß-Strahl $M^2 = 1$ wird.

A.4 Lambertsches Gesetz

Die Reflexionseigenschaft von Papier folgt näherungsweise dem Lambertschen Gesetz. Es sei eine lambertsche Oberfläche mit einem kleinen Laserspot unter der Leistung P_1 bestrahlt. Dann gilt für die diffus reflektierte Strahlungsintensität I_d

$$I_d = I_0 \cdot P_1 \cdot \cos \eta , \quad (\text{A.15})$$

mit I_0 als der normierten Strahlungsintensität in Normalenrichtung und dem Reflexionswinkel η zur Oberflächennormalen [71].

Mittels eines am DLR-RM entwickelten Messgerätes³ wurde I_0 von weißem und grauem Papier zu $0,34 \text{ sr}^{-1}$ respektive $0,26 \text{ sr}^{-1}$ bestimmt.

A.5 Objektiv VR-SCAN 1:2,8/25

Das im *VR-SCAN* verbaute Objektiv (Abbildung 5.10) ist eine Eigenentwicklung nach einer kundenspezifischen Auslegung der Linos Photonics GmbH⁴, welche auch die Linsen herstellte. Das Objektiv ist sehr kompakt und lichtstark. Tabelle A.1 fasst die technischen Daten zusammen.

³Chamber of Gnosis (Raum der Erkenntnis): im DLR/RM entwickeltes Messgerät zur Abschätzung der Reflexionseigenschaften von Oberflächen

⁴Gehört heute zur Qioptiq Photonics GmbH & Co. KG (<http://www.qioptiq.de/>)

Tabelle A.1: Technische Daten Objektiv *VR-SCAN 1:2,8/25*

Type	Radius	Distance	Glass	Index	Ape-y
OBJ	Infinity	0.1E21		1.0	0.0
1	13.5923	4.0	N-LAF21	1.783402	7.50
2	Infinity	2.93759		1.0	7.41
3	-17.5228	1.3	N-SF4	1.747801	4.95
4	10.6294	1.0		1.0	4.30
STO	Infinity	1.76241		1.0	3.17
6	32.8677	4.0	N-LAF21	1.783402	5.46
7	-13.6428	18.47741		1.0	6.09
IMG	Infinity			1.0	7.22
First order data at infinite conjugates					
EFL	Eff.focal length	25.00057	SK1	Princ.Plane 1	9.88313
FNO	f-number	2.8	SK2	Princ.Plane 2	-6.43718
First order data at used conjugate					
MAG	Magnification	0.0	SEP	Entr.Pup.Loc.	11.03859
NAO	Num.ape.object	0.0	EPD	Entr.Pup.Dia.	8.92877
NA	Num.ape.image	0.17857	APD	Exit Pup.Dia.	8.53434
BFL	Back focal length	18.56339	SAP	Exit Pup.Loc.	-5.33276
DEF	Defocus	-0.08598	PRD	pupil relay dist	-1.37135
IMD	Image distance	18.47741	OAL	S1 → Image	33.47741
OID	Object → Image	0.1E21	SYL	System length	15.0

B Bilder

B.1 Entfernungsmesser in Industrie und Forschung

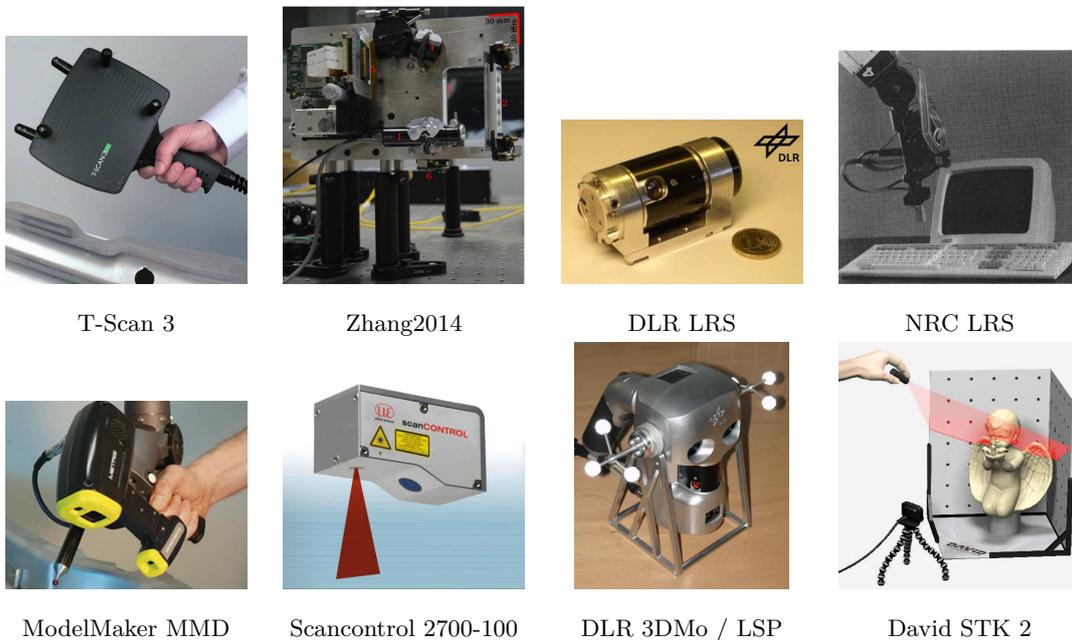


Abbildung B.1: Aktive optische Entfernungsmesser in Industrie und Forschung (1)

Abbildung B.1 zeigt den ersten Teil der recherchierten Entfernungsmesser.

Bildnachweis (von l.o. nach r.u.):

Steinbichler, Tianjin University [108], DLR, NRC¹ Canada [78],
Nikon, Micro Epsilon, DLR [94], David.

¹National Research Council

B Bilder



Atos Compact Scan



Go!Scan 20



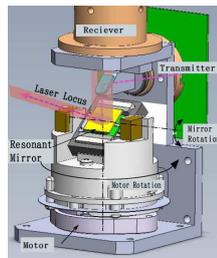
FlyTri Face



Spider



Sokuiki URG-04LX



Kimoto2014



SR4000



Camboard nano



Zebedee



Xtion



TACO



LARS

Abbildung B.2: Aktive optische Entfernungsmesser in Industrie und Forschung (2)

Abbildung B.2 zeigt den zweiten Teil der recherchierten Entfernungsmesser.

Bildnachweis (von l.o. nach r.u.):

GOM, Creaform, Universität Erlangen, Artec 3D,

Hukoyo, [62], MESA Imaging, pmd,

CSIRO², Asus, Fraunhofer IPMS³, NRC Canada [12].

²Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation

³Institut für Photonische Mikrosysteme

C Laserklassifizierung

Die Klassifizierung des *VR-SCAN* erfolgt nach DIN 60825-1 [32].

Der resonant schwingende MEMS Spiegel ist als richtungsveränderliche Quelle anzusehen und die Oszillation wird als Pulsfolge betrachtet. Bezugspunkt für die Berechnung ist der Scheitelpunkt der Ablenkung ([32], Tabelle 12). Die Zeitbasis T_K für die Untersuchung beträgt für Laserklasse 2 (sichtbares Licht) 0,25 s ([32], Abschnitt 8.3e).

Die Winkelausdehnung der Quelle ist im Fall eines kollimierten Strahles als klein anzusehen. Damit wird der Faktor C_6 gleich eins. Daher kann die vereinfachte Bewertung nach den Messbedingungen in Tabelle 11 in [32] durchgeführt werden: Die Messung muss mit einer Blende mit 7 mm Durchmesser im Abstand von 100 mm erfolgen.

Zur Bestimmung der Laserklasse wird eine Belastung mit der maximalen Leistung und maximalen Pulslänge angenommen. Nach Abschnitt 8.3f in [32] (Wiederholt gepulste oder modulierte Laser) muss untersucht werden, welche der Kriterien 1), 2), oder 3) die größte Einschränkung darstellt. Die GZS¹-Werte werden den Tabellen 4 und 6 in [32] entnommen.

Wie in [15] dargelegt, stellt Kriterium 3 a) die maßgebliche Einschränkung beim *VR-SCAN* dar:

Kriterium 3 a) [32]: Für konstante Impulsenergie und Impulsdauer: Die Energie je Impuls darf den GZS für einen einzelnen Impuls multipliziert mit dem Korrekturfaktor C_5 nicht überschreiten.

Ein Impuls entsteht durch Überstreichen der Messblende durch den vom MEMS Spiegel abgelenkten Laser. Es ist vom ungünstigsten Fall auszugehen, folglich muss die Messblende an den Umkehrpunkten der harmonischen Schwingung positioniert werden. Dort ist die Winkelgeschwindigkeit am geringsten und damit die Impulsdauer Δt maximal. Durch Abschalten des Lasers an den Umkehrpunkten für $|\alpha| > A - \Delta\alpha$ (A = Schwingungsamplitude) lässt sich die Impulsdauer mit steigendem $\Delta\alpha$ verkürzen.

Die maximal zulässige Laserleistung berechnet sich durch

$$P_{l,\max} = \frac{\text{GZS}_3}{\Delta t} \quad (\text{C.1})$$

mit dem GZS₃-Wert nach Kriterium 3

$$\text{GZS}_3 = C_5 \cdot \text{GZS}_1 = C_5 \cdot 7 \cdot 10^{-4} \Delta t^{0,75} [J] \quad (\text{C.2})$$

¹Grenzwert für zulässige Strahlung

und

$$C_5 = N^{-0,25} \quad (\text{C.3})$$

mit der Anzahl N der Impulse in der anzuwendenden Zeitdauer von 0,25 s. Mit der Frequenz des Spiegels f und der Zeitbasis T_K gilt

$$N = 2 f T_K . \quad (\text{C.4})$$

Die Impulsdauer ergibt sich mit der harmonischen Kosinus-Schwingung (Grundschiwingung des Bewegungsmodells aus Gleichung (5.12)) zu

$$\Delta t = \frac{1}{2\pi f} \left(\arccos \left(\frac{A - \Delta\alpha}{A} \right) - \arccos \left(\frac{A - \Delta\alpha - \arctan(7/100)}{A} \right) \right) . \quad (\text{C.5})$$

Die Auslegung des *VR-SCAN* liefert $A = 0.4$ rad, $\Delta\alpha = 0.05$ rad und $f = 250$ Hz. Eingesetzt in die o.g. Gleichungen ergibt sich $P_{1,\max}$ zu 1,80 mW in Laserklasse 2.

Literaturverzeichnis

- [1] 3D Laser Mapping. *Hand-Held Indoor Mapping: ZEB1*. 2014. URL: http://www.3dlasermapping.com/images/Indoor/ZEB1_Indoor_Scanner_Brochure.pdf (besucht am 13.11.2014).
- [2] ABB. *Datenblatt: IRB 2400 Industrial Robot*. 2014. URL: [http://www05.abb.com/global/scot/scot241.nsf/veritydisplay/beat7e138b7c811bcc1257c0600411eca/\\$file/Datenblatt_IRB2400_web.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot241.nsf/veritydisplay/beat7e138b7c811bcc1257c0600411eca/$file/Datenblatt_IRB2400_web.pdf) (besucht am 15.01.2014).
- [3] John Aloimonos, Isaac Weiss und Amit Bandyopadhyay. „Active vision“. In: *International Journal of Computer Vision* 1.4 (1988), S. 333–356.
- [4] Markus-Christian Amann u. a. „Laser ranging: a critical review of usual techniques for distance measurement“. In: *Optical Engineering* 40.1 (2001), S. 10–19. DOI: 10.1117/1.1330700.
- [5] R. Andraka. „A survey of CORDIC algorithms for FPGA based computers“. In: *Proceedings of the 1998 ACM/SIGDA sixth international symposium on Field programmable gate arrays*. ACM. 1998, S. 191–200. ISBN: 0897919785.
- [6] Klaus Arbter. „Affinvariante Fourierdeskriptoren ebener Kurven“. Diss. Technische Universität Hamburg-Harburg, 1990.
- [7] Artec. *Artec Spider*. 2014. URL: <http://www.artec3d.com/hardware/artec-spider/specifications/> (besucht am 15.08.2014).
- [8] Asus. *Xtion Pro Live*. 2014. URL: http://www.asus.com/Multimedia/Xtion_PRO_LIVE/ (besucht am 15.07.2014).
- [9] Rejean Baribeau und Marc Rioux. „Influence of speckle on laser range finders“. In: *Appl. Opt.* 30(20) (1991), S. 2873–2878.
- [10] Barrett Technology. *Datasheet WAM Arm*. 2014. URL: http://www.barrett.com/robot/DS_WAM.pdf (besucht am 15.07.2014).
- [11] Paul Bellendorf. „Hoch aufgelöste 3D-Dokumentation mittelalterlicher Oberflächen“. In: *Farbe im Mittelalter: Materialität–Medialität–Semantik* 2 (2011), S. 95.
- [12] J.-A. Beraldin u. a. „Eye-Safe Digital 3-D Sensing for Space Applications“. In: *Opt. Eng.* 39(1) (2000), S. 196–211.
- [13] P.J. Besl. „Active, optical range imaging sensors“. In: *Machine vision and applications* 1.2 (1988), S. 127–152.
- [14] G. Bickel, G. Häusler und M. Maul. „Triangulation with expanded range of depth“. In: *Optical engineering(Bellingham. Print)* 24.6 (1985), S. 975–977.

- [15] Markus Bihler. „Auslegung, Implementierung und Inbetriebnahme eines Lasertreibers für einen Laserscanner“. Bachelorarbeit. FH Augsburg, 2013.
- [16] F. Blais. „Review of 20 years of range sensor development“. In: *Journal of Electronic Imaging* 13(1) (2004), S. 231–243.
- [17] F. Blais und J.-A. Beraldin. „Calibration of an Anamorphic Laser Based 3-D Range Sensor“. In: *SPIE Proceedings, Videometrics V. San-Diego, California, USA* 3174 (1997), S. 113–122. URL: http://www.iit.nrc.gc.ca/publications/nrc-40216_e.html.
- [18] F. Blais und M. Rioux. „Real-time numerical peak detector“. In: *Signal Processing* 11.2 (1986), S. 145–155.
- [19] F. Blais, M. Rioux und J.A. Beraldin. „Practical considerations for a design of a high precision 3-D laser scanner system“. In: *Proc. SPIE*. Bd. 959. 1988, S. 225–246.
- [20] Francois Blais. „Control Of Low Inertia Galvanometers For High Precision Laser Scanning Systems“. In: *Optical Engineering* 27.2 (1988), S. 272104. DOI: 10.1117/12.7976653. URL: <http://dx.doi.org/10.1117/12.7976653>.
- [21] Francois Blais, J. A. Beraldin und Sabry F. El-Hakim. „Range error analysis of an integrated time-of-flight, triangulation, and photogrammetric 3D laser scanning system“. In: *Proc. SPIE* 4035 (2000), S. 236–247. DOI: 10.1117/12.397796. URL: <http://dx.doi.org/10.1117/12.397796>.
- [22] T. Bodenmüller. „Streaming Surface Reconstruction from Real Time 3D Measurements“. Diss. TU München, 2009.
- [23] M. Bosse, R. Zlot und P. Flick. „Zebedee: Design of a Spring-Mounted 3-D Range Sensor with Application to Mobile Mapping“. In: *Robotics, IEEE Transactions on* 28.5 (Okt. 2012), S. 1104 –1119. ISSN: 1552-3098. DOI: 10.1109/TR0.2012.2200990.
- [24] Jörg Butterfaß u. a. „DLR-Hand II: Next generation of a dextrous robot hand“. In: *Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on*. Bd. 1. IEEE. 2001, S. 109–114.
- [25] Shengyong Chen, Youfu Li und Ngai Ming Kwok. „Active vision in robotic systems: A survey of recent developments“. In: *The International Journal of Robotics Research* 30.11 (2011), S. 1343–1377. DOI: 10.1177/0278364911410755. eprint: <http://ijr.sagepub.com/content/30/11/1343.full.pdf+html>.
- [26] Jacky C. K. Chow und Derek D. Lichti. „A study of systematic errors in the PMD CamBoard nano“. In: *Proc. SPIE* 8791 (2013), S. 87910X–87910X–10. DOI: 10.1117/12.2020000. URL: <http://dx.doi.org/10.1117/12.2020000>.
- [27] Creaform. *Go!SCAN*. 2014. URL: <http://www.creaform3d.com/en/technical-specifications-goscan-3d> (besucht am 15.08.2014).

- [28] Brian Curless und Marc Levoy. „Better optical triangulation through spacetime analysis“. In: *Computer Vision, 1995. Proceedings., Fifth International Conference on*. IEEE. 1995, S. 987–994.
- [29] DAVID. *DAVID-Laserscanner Starter Kit 2*. 2014. URL: https://ssl.david-vision-systems.de/shop/product_info.php/info/p127_DAVID-Starter-Kit.html (besucht am 15.08.2014).
- [30] W.O. Davis, R. Sprague und J. Miller. „MEMS-based pico projector display“. In: *Optical MEMs and Nanophotonics, 2008 IEEE/LEOS International Conference on*. Aug. 2008, S. 31–32. DOI: 10.1109/OMEMS.2008.4607813.
- [31] DIN 1319-1:1995-01. *Grundlagen der Messtechnik - Teil 1: Grundbegriffe*. Beuth. Jan. 1995.
- [32] DIN 60825-1:2008-05. *sicherheit von Lasereinrichtungen - Teil 1: Klassifizierung von Anlagen und Anforderungen*. Beuth. Mai 2008.
- [33] R.G. Dorsch, G. Häusler und J. M. Herrmann. „Laser triangulation: fundamental uncertainty in distance measurement“. In: *Applied Optics* 33(7) (1994), S. 1306–1314.
- [34] W. Dremel, G. Häusler und M. Maul. „Triangulation With Large Dynamical Range“. In: *Proc. SPIE* 0665 (1986), S. 182–187. DOI: 10.1117/12.938742. URL: <http://dx.doi.org/10.1117/12.938742>.
- [35] Jürgen Eichler, Lothar Dünkel und Bernd Eppich. „Die Strahlqualität von Lasern – Wie bestimmt man Beugungsmasszahl und Strahldurchmesser in der Praxis?“ In: *Laser Technik Journal* 1.2 (Okt. 2004), S. 63–66. DOI: 10.1002/latj.200790019.
- [36] Svenja Ettl. „Introductory review on ‘Flying Triangulation’: a motion-robust optical 3D measurement principle“. In: *Contemporary Physics* ahead-of-print (2014), S. 1–15.
- [37] R. B. Fisher und D. K. Naidu. „A Comparison of Algorithms for Subpixel Peak Detection“. In: *Image Technology, Advances in Image Processing, Multimedia and Machine Vision*. 1996, S. 385–404.
- [38] J. Flügge und K. Michel. *Die wissenschaftliche und angewandte Photographie*. Springer, 1955.
- [39] J. Forest u. a. „Laser stripe peak detector for 3D scanners. A FIR filter approach“. In: *International Conference on Pattern Recognition*. Bd. 3. 2004, S. 646–649.
- [40] B. Fowler u. a. „An Ultra Low Noise High Speed CMOS Linescan Sensor for Scientific and Industrial Applications“. In: *Proc. Workshop on CCD and AIS, Elmau, Germany*. 2003.
- [41] Stan Franklin und Art Graesser. „Is it an Agent, or just a Program?: A Taxonomy for Autonomous Agents“. In: *Intelligent agents III agent theories, architectures, and languages*. Hrsg. von Jörg P. Müller, Michael J. Wooldridge und Nicholas R. Jennings. Springer, 1997, S. 21–35.

- [42] C. Fröhlich und M. Mettenleiter. „Terrestrial laser scanning—new perspectives in 3D surveying“. In: *International archives of photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences* 36.Part 8 (2004), W2.
- [43] GOM. *Atos Compact Scan*. 2014. URL: <http://www.gom.com/de/messsysteme/systemuebersicht/atos-compact-scan.html> (besucht am 15.08.2014).
- [44] H Gonzalez-Jorge u. a. „Metrological evaluation of microsoft kinect and asus xtion sensors“. In: *Measurement* 46.6 (2013), S. 1800–1806.
- [45] G. Guidi, J.-A. Beraldin und C. Atzeni. „High-accuracy 3D modeling of cultural heritage: the digitizing of Donatello’s Maddalena“. In: *Image Processing, IEEE Transactions on* 13.3 (März 2004), S. 370–380. ISSN: 1057-7149. DOI: 10.1109/TIP.2003.822592.
- [46] F. Hacker, J. Dietrich und G. Hirzinger. „A laser-triangulation based miniaturized 2-d range-scanner as integral part of a multisensory robot-gripper.“ In: *Proceedings EOS 14th Topical Meeting on Optoelectronic Distance/ Displacement Measurements and Applications*. Ecole des Mines de Nantes, France, 1997. URL: <http://elib.dlr.de/28573/>.
- [47] S. Haddadin u. a. „Towards the robotic co-worker“. In: *submitted to: International Symposium on Robotics Research (ISRR2007), Lausanne, Switzerland*. 2009.
- [48] U. Hagn. „The aspect of versatility in the design of a lightweight robot for surgical applications“. Diss. Universität Hannover, 2011.
- [49] U. Hagn u. a. „DLR MiroSurge: a versatile system for research in endoscopic telesurgery“. In: *International journal of computer assisted radiology and surgery* 5.2 (2010), S. 183–193. ISSN: 1861-6410.
- [50] U. Hagn u. a. „The DLR MIRO: a versatile lightweight robot for surgical applications“. In: *Industrial Robot: An International Journal* 35.4 (2008), S. 324–336.
- [51] G. Hirzinger u. a. „DLR’s torque-controlled light weight robot III—are we reaching the technological limits now?“ In: *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA ’02. IEEE International Conference on*. Bd. 2. 2002, 1710–1716 vol.2. DOI: 10.1109/ROBOT.2002.1014788.
- [52] Gerd Hirzinger u. a. „Sensor-based space robotics—ROTEX and its telerobotic features“. In: *Robotics and Automation, IEEE Transactions on* 9.5 (1993), S. 649–663.
- [53] P.C.D. Hobbs. *Building electro-optical systems: Making It All Work*. 2. Aufl. Wiley, 2011. ISBN: 978-0-470-40229-0.
- [54] U. Hofmann u. a. „A novel vacuum-packaged low-power scanning mirror with inclined 3D-shaped window“. In: *Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference (TRANSDUCERS), 2011 16th International*. IEEE. 2011, S. 1527–1530.

- [55] Hokuyo. *URG-04LX*. 2014. URL: <http://www.hokuyo-aut.jp/02sensor/07scanner/download/products/urg-04lx/> (besucht am 15.08.2014).
- [56] Denis Jung. „Neuartiges Bauteilkonzept quasistatisch-resonanter 2D-Mikros scanner für die Zielanwendung ultrakompakter Laserprojektionsdisplays“. Diss. TU Dresden, 2012.
- [57] H. Kawata u. a. „Development of ultra-small lightweight optical range sensor system“. In: *Proc. of IROS*. Aug. 2005, S. 1078–1083. DOI: 10.1109/IROS.2005.1545476.
- [58] S. Kielhöfer. „Fehleranalyse und Modellierung eines 3D-Laserscansystems“. Diplomarbeit. Technische Universität München, 2003.
- [59] S. Kielhöfer. „Kalibrierverfahren“. Pat. DE 10 2011 114 156.5. 23. Sep. 2011.
- [60] S. Kielhöfer u. a. „DLR VR-SCAN: A versatile and robust miniaturized laser scanner for short range 3D-modelling and exploration in robotics“. In: *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on*. Sep. 2011, S. 1933–1939. DOI: 10.1109/IROS.2011.6094927.
- [61] S. Kielhöfer u. a. „Elektrostatisch angetriebener Mikroaktor“. Pat. DE 10 2007 051 715.9. 30. Okt. 2007.
- [62] Katsumi Kimoto u. a. „Development of Small Size 3D LIDAR“. In: *Robotics and Automation (ICRA), 2014 IEEE International Conference on*. Mai 2014, S. 4620–4626.
- [63] Simon Kriegel u. a. „Efficient next-best-scan planning for autonomous 3D surface reconstruction of unknown objects“. English. In: *Journal of Real-Time Image Processing* (2013), S. 1–21. ISSN: 1861-8200. DOI: 10.1007/s11554-013-0386-6.
- [64] KUKA. *Datenblatt: LBR iiwa*. 2014. URL: http://www.kuka-labs.com/NR/rdonlyres/5367918D-1B61-450E-9DB6-62673168A900/0/LBR_iiwa_Data_Sheet_DE_130715.pdf (besucht am 13.11.2014).
- [65] Marc Levoy u. a. „The Digital Michelangelo Project: 3D Scanning of Large Statues“. In: *Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. SIGGRAPH '00. New York, NY, USA: ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 2000, S. 131–144. ISBN: 1-58113-208-5. DOI: 10.1145/344779.344849.
- [66] Carlos A. Luna u. a. „Calibration of line-scan cameras“. In: *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on* 59.8 (2010), S. 2185–2190.
- [67] R.C. Luo und M.G. Kay. „Multisensor integration and fusion in intelligent systems“. In: *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on* 19.5 (Sep. 1989), S. 901–931. ISSN: 0018-9472. DOI: 10.1109/21.44007.
- [68] David MacKinnon, Victor Aitken und François Blais. „Review of measurement quality metrics for range imaging“. In: *Journal of Electronic Imaging* 17.3 (2008), S. 033003–033003–14. DOI: 10.1117/1.2955245.

- [69] MESA Imaging. *SR4000*. 2014. URL: <http://www.mesa-imaging.ch/products/sr4000/> (besucht am 15.08.2014).
- [70] Micro-Epsilon. *scanCONTROL 2700-100*. 2014. URL: <http://www.micro-epsilon.de/laser-scanner/scanCONTROL/Laser-scanner-selection/index.html> (besucht am 15.08.2014).
- [71] H. Naumann und G. Schröder. *Bauelemente der Optik: Taschenbuch der technischen Optik*. 6. Auflage. München, Wien: Hanser, 1992. ISBN: 3-446-17036-7.
- [72] Nikon. *Digitaler Laserscanner ModelMaker Dx für die portable 3D-Inspektion und Reverse Engineering-Anwendungen*. 2014. URL: http://www.nikonmetrology.com/de_EU/Produkte/3D-Laserscanner/Handgefuehrte-3D-Laserscanner/ModelMaker-MMDx2 (besucht am 15.08.2014).
- [73] Thierry Oggier u. a. „An all-solid-state optical range camera for 3D real-time imaging with sub-centimeter depth resolution (SwissRanger)“. In: *Proc. SPIE* 5249 (2004), S. 534–545. DOI: 10.1117/12.513307. URL: <http://dx.doi.org/10.1117/12.513307>.
- [74] C. Ott u. a. „A Humanoid Two-Arm System for Dexterous Manipulation“. In: *Humanoid Robots, 2006 6th IEEE-RAS International Conference on*. Dez. 2006, S. 276–283. DOI: 10.1109/ICHR.2006.321397.
- [75] R. Pito. „A solution to the next best view problem for automated surface acquisition“. In: *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* 21.10 (Okt. 1999), S. 1016–1030. ISSN: 0162-8828. DOI: 10.1109/34.799908.
- [76] pmd. *CamBoard nano*. 2014. URL: http://www.pmdtec.com/products_services/reference_design.php (besucht am 15.08.2014).
- [77] M. Rioux. „Laser range finder based on synchronized scanners“. In: *Applied Optics* 23.21 (1984), S. 3837–3844. ISSN: 1539-4522.
- [78] M. Rioux u. a. „Design of a large depth of view three-dimensional camera for robot vision“. In: *Optical Engineering* 26.12 (1987), S. 1245–1250. ISSN: 0091-3286.
- [79] B. Rooks. „The harmonious robot“. In: *Industrial Robot* 33.2 (2006), S. 125–130.
- [80] A. Rücker. *Gestaltung eines Laserscanners als Roboter- und als handgeführtes Modul*. Großer Beleg. Technische Universität Dresden, 2011. URL: <http://elib.dlr.de/73474/>.
- [81] T. Sandner u. a. „Large aperture MEMS scanner module for 3D distance measurement“. In: *Proceedings of SPIE*. Bd. 7594. 2010, S. 75940D.
- [82] Harald Schenk. „Ein neuartiger Mikroaktor zur ein- und zweidimensionalen Ablenkung von Licht“. Diss. Gerhard-Mercator-Universität-Gesamthochschule-Duisburg, 2000.
- [83] Thomas Schwerin. „Scanwinkelmessung bei einem MEMS-basierten Laser-Entfernungsmesser“. Diplomarbeit. FH Nürnberg, 2008.

- [84] Andrea Schwier u. a. „VR-Map: A New Device for Patient Registration and Optimal Robot Positioning“. In: *CURAC*. 2010.
- [85] Guenther Seitz und Hans J Tiziani. „Resolution limits of active triangulation systems by defocusing“. In: *Optical Engineering* 32.6 (1993), S. 1374–1383.
- [86] Vitor Sequeira u. a. „Automated 3D reconstruction of interiors with multiple scan views“. In: *Proc. SPIE*. Bd. 3641. 1998, S. 106–117. DOI: 10.1117/12.333775.
- [87] B. Siciliano und O. Khatib. *Springer handbook of robotics*. Springer-Verlag New York Inc, 2008.
- [88] Steinbichler. *T-SCAN 3*. 2014. URL: <http://www.steinbichler.de/produkte/surface-scanning/3d-digitalisierung/t-scan-3.html> (besucht am 15.08.2014).
- [89] K. H. Strobl und G. Hirzinger. „Optimal hand-eye calibration“. In: *Intelligent Robots and Systems, 2006 IEEE/RSJ International Conference on*. IEEE. 2006, S. 4647–4653.
- [90] K. H. Strobl u. a. „The DLR multisensory Hand-Guided Device: The Laser Stripe Profiler“. In: *Proc. of ICRA*. Bd. 2. Mai 2004, 1927–1932 Vol.2. DOI: 10.1109/ROBOT.2004.1308105.
- [91] K. H. Strobl u. a. „The self-referenced DLR 3D-modeler“. In: *Proc. of IROS*. Okt. 2009, S. 21–28. DOI: 10.1109/IROS.2009.5354708.
- [92] M. Suppa. „Autonomous robot work cell exploration using multisensory eye-in-hand systems“. Diss. Universität Hannover, 2007.
- [93] M. Suppa und G. Hirzinger. „Ein Hand-Auge-System zur multisensoriellen Rekonstruktion von 3D-Modellen in der Robotik“. In: *Automatisierungstechnik* 53.7 (2005).
- [94] M. Suppa u. a. „The 3D-Modeller: A Multi-Purpose Vision Platform“. In: *Proc. of ICRA*. Apr. 2007, S. 781–787. DOI: 10.1109/ROBOT.2007.363081.
- [95] Jens T Thielemann u. a. „TACO: A Three-dimensional Camera with Object Detection and Foveation“. In: *11th International Conference on Simulation of Adaptive Behavior, SAB 2010*. 2010, S. 718–728. DOI: 10.1007/11861898_72.
- [96] S. Thrun. „Probabilistic robotics“. In: *Communications of the ACM* 45.3 (2002), S. 52–57.
- [97] Bernat Tiana i Campanera. „Digital 1D image processing for a laser range finder (laser scanner): Peak Detection“. Diploma Thesis. Ramon Llull University, 2008.
- [98] A. Tortschanoff u. a. „Optical position feedback and phase control of MOEMS scanner mirrors“. In: *Proceedings of SPIE*. Bd. 7594. 2010, 75940K.
- [99] Holger Urbanek. „Method for computer-aided processing of action potentials of muscles of e.g. human body, involves solving set of equations such that values for segment action potentials and values for action potentials of each volume segment are obtained“. Dt. Patentanmeld. DE102012211799 (A1). 2014.

- [100] VDI 2860:1990-05. *Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole*. Beuth. 1990.
- [101] M. Vincze u. a. *D5.2 - TACO Final Test Report*. Report. The TACO Project (FP7/248623 2010-2013), 2013.
- [102] X. Wang und D.C. Flanders. „System and method for tilt mirror calibration due to capacitive sensor drift“. Pat. 6,538,802. März 2003.
- [103] M. Weinmann u. a. „A Multi-camera, Multi-projector Super-Resolution Framework for Structured Light“. In: *3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization and Transmission (3DIMPVT), 2011 International Conference on*. Mai 2011, S. 397–404. DOI: 10.1109/3DIMPVT.2011.57.
- [104] Simon Winkelbach, Sven Molkenstruck und Friedrich M. Wahl. „Low-Cost Laser Range Scanner and Fast Surface Registration Approach“. In: *DAGM-Symposium*. 2006, S. 718–728. DOI: 10.1007/11861898_72.
- [105] A. Wolter u. a. „Torsional stress, fatigue and fracture strength in silicon hinges of a micro scanning mirror“. In: *Proceedings of SPIE*. Hrsg. von Danelle M. Tanner und Rajeshuni Ramesham. Bd. 5343. 2004, S. 176–185.
- [106] Tilo Wüsthoff. *Produktanalyse Scanner (interner Bericht)*. Techn. Ber. DLR, 2009.
- [107] Zhixing Xue u. a. „An automatic grasp planning system for service robots“. In: *Advanced Robotics, 2009. ICAR 2009. International Conference on*. IEEE. 2009, S. 1–6.
- [108] Hanlin Zhang u. a. „Flying spot laser triangulation scanner using lateral synchronization for surface profile precision measurement“. In: *Appl. Opt.* 53 (2014), S. 4405–4412. DOI: 10.1364/AO.53.004405. URL: <http://www.opticsinfobase.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-53-20-4405>.
- [109] Z. Zhang. „A flexible new technique for camera calibration“. In: *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* 22.11 (2000), S. 1330–1334. ISSN: 0162-8828.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Simon Kielhöfer
Ringstr. 38
86911 Dießen am Ammersee
Tel.: (0178) 6510043
E-Mail: kielhoefer@gmx.de
Geboren am 07.05.1976 in Stuttgart
Ledig, deutsch, 1 Kind

Schulbildung

09.1986–07.1995 Gymnasium in Augsburg
Abschluss: Abitur, Note 2,2

Zivildienst

07.1995–07.1996 Seniorenheim in 86356 Westheim

Studium

11.1996–09.2003 Maschinenbau an der Technischen Universität München
Studienrichtung: Konstruktion und Entwicklung
Abschluss: Diplom, Note 2,2
Diplomarbeit: Fehleranalyse und Modellierung eines 3D-Laserscansystems,
Note 1,0
07.2000–07.2001 Auslandsstudium in Spanien an der Universidad Politécnica de Ma-
drid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales
Erasmus Stipendium

Beruflicher Werdegang

02.2004–09.2004 Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt in Oberpfaffenhofen
Institut für Robotik und Mechatronik
freiberuflicher Mitarbeiter
09.2004–10.2015 Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt in Oberpfaffenhofen
Institut für Robotik und Mechatronik
wissenschaftlicher Mitarbeiter
Forschungsgebiete: Optische 3D Messtechnik, Robotik, Laserscanner,
Optik, MEMS Mikrospiegel, Kalibrierung

ab 11/2015 Europäisches Patentamt in München
Patentprüfer

Veröffentlichungen

- Publikationen Kielhöfer, S.; Bahls, T.; Hacker, F.; Wüsthoff, T. & Suppa, M.
DLR VR-SCAN: A versatile and robust miniaturized laser scanner for short range 3D-modelling and exploration in robotics
Proc. of IROS, 2011, 1933 -1939
- Schwier, A.; Konietschke, R.; Bodenmüller, T.; Ende, T.; Kielhöfer, S. & Hirzinger, G.
VR-Map: A New Device for Patient Registration and Optimal Robot Positioning
CURAC, 2010
- Strobl, K. H.; Mair, E.; Bodenmüller, T.; Kielhöfer, S.; Sepp, W.; Suppa, M.; Burschka, D. & Hirzinger, G.
The self-referenced DLR 3D-modeler
Proc. of IROS, 2009, 21-28
- Suppa, M.; Kielhöfer, S.; Langwald, J.; Hacker, F.; Strobl, K. & Hirzinger, G.
The 3D-Modeller: A Multi-Purpose Vision Platform
Proc. of ICRA, 2007, 781-787
- Ott, C.; Eiberger, O.; Friedl, W.; Bauml, B.; Hillenbrand, U.; Borst, C.; Albu-Schaffer, A.; Brunner, B.; Hirschmüller, H.; Kielhöfer, S.; Konietschke, R.; Suppa, M.; Wimböck, T.; Zacharias, F. & Hirzinger, G.
A Humanoid Two-Arm System for Dexterous Manipulation
Humanoid Robots, 2006 6th IEEE-RAS International Conference on, 2006, 276-283
- Kielhöfer, S.
Fehleranalyse und Modellierung eines 3D-Laserscansystems
Diplomarbeit, Technische Universität München, 2003
- Patente Kielhöfer, S.; Reinecke, J.; Chalon, M. & Friedl, W.
Berührungssensor
DE 10 2012 025 641.8, 2012
- Kielhöfer, S.
Kalibrierverfahren
DE 10 2011 114 156.5, 2011
- Gruber, R.; Baumann, A. & Kielhöfer, S.
Vorrichtung zum Andocken eines Service-Satelliten an einen Zielsa-

telliten

DE 10 2008 061 977.9, 2008

Kielhöfer, S.; Hagn, U.; Konietschke, R.; Suppa, M.; Hacker, F. & Bodenmüller, T.

Verfahren zum Abtasten der dreidimensionalen Oberfläche eines Objekts mittels eines Lichtstrahl-Scanners

DE 10 2008 039 838.1, 2008

Kielhöfer, S.; Gruber, R.; Schott, J.; Nickl, M. & Hacker, F.

Elektrostatisch angetriebener Mikroaktor

DE 10 2007 051 715.9, 2007

Friedl, W.; Hagn, U.; Kielhöfer, S.; Hacker, F. & Suppa, M.

Triangulationsscanner

DE 10 2006 001 382.4, 2006

Dießen, 23. Oktober 2015