



Technische Universität München  
Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt  
Lehrstuhl Wasserbau und Wasserwirtschaft

# SohleDigital - unterwasserphotogrammetrische Erfassung von Sohltopographien auf Einzelkornebene

Tobias Jürgen Erwin Liepert

Vollständiger Abdruck der von der Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines **Doktor-Ingenieurs** genehmigten Dissertation.

**Vorsitzender:**

Prof. Dr.-Ing. Christian Große

**Prüfende der Dissertation:**

1. Prof. Dr. sc. techn. Peter Rutschmann
2. Hon.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Heinzelmann
3. Prof. Koen Blanckaert, Ph.D.

Die Dissertation wurde am 20.02.2020 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt am 25.03.2020 angenommen.



## Zusammenfassung

Die im Gewässer ablaufenden sedimentologischen Prozesse wirken sich massiv auf die Bemessung, die Errichtung und den Betrieb von Bauwerken am oder im Fluss aus. Mit den existierenden, klassischen sedimentologischen Modellen, die idealisierten physikalischen Modellversuchen entspringen, lässt sich das Verhalten der Sohle im Nahbereich von Bauwerken oftmals nur ungenügend beschreiben. Zur Überarbeitung bestehender sedimentologischer Modelle oder zur Konzeptionierung neuartiger Ansätze bedarf es jedoch hochwertiger Messdaten, die die ablaufenden Transportprozesse auf Einzelkornebene sichtbar machen. Bisherige Messverfahren zur Erfassung sedimentologischer Daten konnten dies nur bedingt leisten, da sie sich entweder auf eine hohe Auflösung des Raums oder der Zeit spezialisierten. Das in dieser Arbeit entwickelte Messsystem liefert hingegen räumlich und zeitlich hochaufgelöste Messdaten und gibt so einen tiefen Einblick in die sohlmorphologischen Prozesse.

Das in dieser Arbeit entwickelte photogrammetrische System erfasst die Sohltopographie auf Einzelkornebene im laufenden Versuch unter Wasser. Die Unterwasseraufnahmen erfolgten über ein mit hemisphärischen Vorsatzlinsen ausgestattetem Mehrkameranystem, das die dynamischen Sohlprozesse räumlich und zeitlich hochauflösend aufzeichnete. Die Unterwasseraufnahmen wurden über ein spezielles Verfahren aufbereitet, so dass daraus Punktwolken abgeleitet werden konnten, die die Einzelkörner zu erkennen gaben.

Einleitend werden verschiedenste Verfahren, die der Erfassung von sohlmorphologischen Veränderungen dienen, kurz vorgestellt und hinsichtlich ihrer Eignung diskutiert. Mit dem Anspruch, die Sohltopographie räumlich und zeitlich hochaufgelöst auf Einzelkornebene zu erfassen, kristallisierte sich die Photogrammetrie als das geeignetste Messverfahren heraus. Im weiteren Fortgang diskutiert die Arbeit die photogrammetrischen und die optischen Besonderheiten, die sich aus dem Mehrmedieneinsatz ergeben. Schwerpunktmäßig erörtert der theoretische Teil die Abstandsabhängigkeit der Unterwasserverzeichnungen, die Verzeichnungscharakteristik der hemisphärischen Vorsatzlinsen und deren optisches Abbildungsverhalten im Mehrmedieneinfall.

Die praktischen Versuche fanden an der Versuchsanstalt Obernach der Technischen Universität München statt. Dort wurde das Mehrkameranystem in ein Gerinne mit beweglicher Sohle eingebaut und umfassend getestet. Mit einem speziellen Vorgehen zur Zentrumsausrichtung, das die Koinzidenz der Eintrittspupille des Objektivs mit dem Zentrum der Vorsatzlinse bis auf wenige zehntel Millimeter herstellt, konnten die durch die Vorsatzlinsen verursachten Verzeichnungen auf wenige Pixel begrenzt werden. Die verbliebenen Restverzeichnungen der Vorsatzlinsen wurden mittels einer Unterwasserkalibrierung quantifiziert und für eine hochgenaue Rekonstruktion der Sohltopographie aus den Unterwasseraufnahmen entfernt, so dass das eingesetzte konventionelle photogrammetrische Modell fehlerfrei angewandt werden konnte. Durch unterschiedliche Weiterverarbeitungsschritte entstanden zudem räumlich vernetzte Darstellungen der Sohle, digitale Geländemodelle und zusammen mit den Bildern Orthophotos. Mit diesen Bild-

und Vermessungsdaten lässt sich die Sohle digital beschreiben. Um daraus einen wasserbaulichen Mehrwert zu generieren, werden verschiedene wasserbauliche Veredelungsprodukte, die relevante Prozessdaten aus den Bild- und Vermessungsdaten extrahieren, andiskutiert.

Das als erweiterter Ausblick zu verstehende Kapitel der wasserbaulichen Veredelungsprodukte zeigt Möglichkeiten des Messsystems zur Gewinnung wasserbaulich relevanter Informationen, darunter die Rauheiten, die mittleren Sohlagen und Einzelkornbewegungen. Perspektivisch lassen sich mit solchen Daten bestehende sedimentologische Modelle verbessern und neuartige Ansätze, beispielsweise datengetriebene Modelle, entwickeln. Zudem wäre es sinnvoll das entwickelte Messsystem mit anderen Messverfahren zu kombinieren, um so zum Beispiel die Strömungsgeschwindigkeiten simultan zu vermessen.

## Abstract

The sedimentological processes taking place in a river massively affect the design, construction and operation of structures situated beside or in the river. Existing sedimentological models, which emerged from idealized physical model experiments, often fail to adequately describe the behaviour of the riverbed in the vicinity of structures. However, the improvement of existing sedimentological models as well as the design of new approaches require more accurate measurement data. The measurement data should resolve the transport process at grain scale with a high temporal resolution. Existing measurement methods do not deliver sufficient spatially and temporally resolved sedimentological data, as they specialize either in a high spatial resolution or in a high temporal resolution. The measurement system developed in this thesis provides both a high spatial and temporal resolution and thus provides a deep insight into riverbed morphological processes.

In this thesis, I develop an underwater photogrammetric system from which a far more accurate digital model of the riverbed can be generated, providing deeper insight into the complex morphological processes taking place in a movable riverbed. A multi-camera system equipped with hemispherical lenses took the underwater images. The image acquisition took place underwater while the experiment was running, which prevents unwanted interruptions. The system recorded the dynamic processes of the riverbed in high spatial and temporal resolution. Together with the developed processing technique, this allows high resolute point clouds to be generated on a single grain scale level.

The Introduction gives an overview of various methods for measuring morphological changes and briefly discusses their suitability for accurate modelling. With the aim of recording the riverbed topography with high spatial and temporal resolution on single scale level, photogrammetry has emerged in the field as the most suitable means of obtaining refined measurements. In the further course of the thesis, I discuss the photogrammetric and optical peculiarities resulting from the application in a multi-media environment. In the Photogrammetry and Optics sections, which deal with the theoretical background, the focus is on the distance dependence of the underwater distortions, the distortion characteristics of the hemispherical lenses, and their optical imaging behavior in multi-media applications.

The practical tests were carried out at the Obernach Hydraulics Laboratory of the Technical University of Munich, where the multi-camera system was installed in a channel with a movable bed and tested extensively. Using a special procedure for center alignment, which establishes the coincidence of the entrance pupil of the lenses with center to hemispherical lens within a few tenths of a millimeter, it was possible to limit the distortion caused by the hemispherical lenses to a few pixels. The remaining residual distortions of the hemispherical lens were quantified by means of an underwater calibration, and removed from the underwater images for a highly accurate reconstruction of the riverbed topography. By conducting image correction to remove refractions from the image as outlined in this thesis, the systematic errors normally produced by conventional photogrammetric modelling can be expunged. Further processing steps create

spatially triangulated meshes, digital terrain models and, together with the images, orthophotos of the bed. With these images and survey data, the riverbed can be described digitally.

The extended outlook presents the potential of the developed measuring system for obtaining information relevant to hydraulic engineers, including roughness, mean riverbed elevations and single grain movements. Future research can make use of such data to improve existing sedimentological models and to develop novel approaches, such as data-driven models. In addition, it would be useful to combine the developed measuring system with other measuring methods, for example to measure flow velocities simultaneously.

## **Vorwort**

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. sc. Peter Rutschmann der mir über all die Jahre hinweg großen Freiraum zur persönlichen Entfaltung und Entwicklung bot und mich stets offen mit seinen Ideen unterstützte.

Herrn Univ. Prof. PhD Koen Blanckaert und Herrn Prof. Dr.-Ing. Christoph Heinzelmann danke ich für die kurzfristige Übernahme der Korreferate.

Mein Dank richtet sich auch an alle Kolleginnen und Kollegen des Lehrstuhls einschließlich der Versuchsanstalt Obernach und dem Dieter-Thoma-Labor, die mir gerade in der letzten Phase den Rücken frei hielten, so dass ich mich auf die Fertigstellung meiner Arbeit konzentrieren konnte.

Durch die Anregungen und Korrekturen der Lektorinnen und Lektoren konnte ich dieser Arbeit den letzten Schliff verpassen, ein recht herzliches Dankeschön hierfür.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Sedimentologische Datenerhebung</b>	<b>4</b>
2.1. Photogrammetrische Verfahren . . . . .	5
2.2. Laufzeitmessverfahren . . . . .	8
2.3. Hydroakustische Verfahren . . . . .	8
2.4. Radiologische Verfahren . . . . .	9
2.5. Druckmessverfahren . . . . .	10
2.6. Zusammenfassung . . . . .	11
<b>3. Photogrammetrie</b>	<b>13</b>
3.1. Structure-from-Motion . . . . .	15
3.2. Kamerakalibrierung . . . . .	16
3.3. Mehrmedieneinsatz . . . . .	17
3.3.1. Sequentielle Bildfolge – Einkamerasysteme . . . . .	18
3.3.2. Synchronisierte Stereoaufnahmen . . . . .	20
3.3.3. Mehrkamerasysteme . . . . .	22
3.3.4. Korrekturmodelle - Strenge Lösung vs. Näherungslösungen . . . . .	23
3.4. Zusammenfassung . . . . .	26
<b>4. Optik</b>	<b>27</b>
4.1. Brechungsindex . . . . .	27
4.2. Unterwassergehäuse - Trennflächengeometrie . . . . .	28
4.3. Strahlengang im Mehrmedienfall . . . . .	29
4.3.1. Ebene Trennfläche . . . . .	30
4.3.2. Hemisphärische Trennfläche . . . . .	32
4.4. Kaustik (Brennfläche) . . . . .	34
4.5. Verzeichnung . . . . .	37
4.5.1. Veränderliche Verzeichnungsparameter . . . . .	40
4.5.2. Abstandsabhängige Verzeichnungsmuster im Mehrmedienfall . . . . .	41
4.5.3. Verzeichnungsmuster hemisphärischer Trennflächen bei fehlender Zentrumskoinzidenz . . . . .	44
4.6. Zwischenfazit . . . . .	46
4.7. Fokus, Blende und Schärfentiefe . . . . .	48
4.8. Zusammenfassung . . . . .	51
<b>5. Versuch</b>	<b>53</b>
5.1. Aufbau . . . . .	53
5.1.1. Versuchsstand . . . . .	53

## Inhaltsverzeichnis

5.1.2.	Sediment . . . . .	55
5.1.3.	Kamera und Objektiv . . . . .	56
5.1.4.	Aufnahmeeinheit . . . . .	57
5.1.5.	Beleuchtung . . . . .	60
5.2.	Unterwasserrekonstruktion . . . . .	60
5.2.1.	Luft-Kalibrierung . . . . .	61
5.2.2.	Ausrichtung der Zentren . . . . .	62
5.2.3.	Unterwasser-Kalibrierung . . . . .	64
5.2.4.	Mobiles Passpunktfeld . . . . .	66
5.2.5.	Unterwasser-SfM . . . . .	67
5.3.	Ergebnisdaten . . . . .	72
5.3.1.	Bilddaten . . . . .	72
5.3.2.	Punktwolken . . . . .	74
5.3.3.	Vernetzung . . . . .	75
5.3.4.	Digitales Geländemodell und Orthophotos . . . . .	76
5.4.	Zusammenfassung . . . . .	78
<b>6.</b>	<b>Datenveredelung</b>	<b>79</b>
6.1.	Mittlere Sohlage und Rauheiten . . . . .	79
6.1.1.	Trendbereinigte Sohle . . . . .	79
6.1.2.	Zeitliche Entwicklung der trendbereinigten Sohle . . . . .	80
6.1.3.	Räumliche und zeitliche Entwicklung der Kornrauheit . . . . .	82
6.1.4.	<i>BASEGRAIN</i> -Sieblinien . . . . .	86
6.1.5.	Mittlere Sohlage . . . . .	88
6.2.	Einzelkornbewegungen . . . . .	90
6.2.1.	Bewegungen aus synthetischen Bildern . . . . .	90
6.2.2.	Bewegung aus entzerrten Bildaufnahmen . . . . .	92
6.2.3.	Zusammenfassung . . . . .	95
<b>7.</b>	<b>Fazit und Ausblick</b>	<b>97</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>I</b>
	<b>Anhang</b>	<b>XI</b>
A.	Kaustiken . . . . .	XI
A.1.	Näherungsmodell . . . . .	XI
A.2.	Geometrische Kenngrößen . . . . .	XIII
B.	Schachbrettmustererkennung . . . . .	XIV
C.	Verfahren zur Bestimmung der Eintrittspupille . . . . .	XVII
D.	Ergebnisse . . . . .	XVIII
D.1.	Trendbereinigte Sohlhöhen . . . . .	XVIII
D.2.	Mittlere Sohle . . . . .	XVIII
	<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>XXV</b>



# 1. Einleitung

Natürliche Fließgewässer mit ihren beweglichen Sohlen fordern seit jeher von den Ingenieurinnen und Ingenieuren ein tiefgehendes Prozessverständnis. Die komplexen Wechselwirkungen spielen bei Bemessung, Errichtung und Betrieb von Bauwerken am oder im Fluss eine wichtige Rolle, beispielsweise bei der Quantifizierung und der Dimensionierung von Hochwasserschutzmaßnahmen. Die klassischen Modelle zur Beschreibung von morphologischen Prozessen entspringen überwiegend aufwändigen Versuchsreihen idealisierter Zustände. Die hieraus abgeleiteten empirischen Transportformeln gelten strenggenommen nur in Situationen, die den Versuchen ähnlich sind. Zur Ausweitung des Anwendungsspektrums wurden die empirischen Transportformeln in den letzten Jahrzehnten mit Modifikationen und Zusatzmodellen versehen, so dass mit Zuschaltung passender Erweiterungsmodelle und korrekter Kalibrierung gute Ergebnisse erzielt werden können. Allerdings erfordert die Vielzahl an morphologischen Kenngrößen und möglichen Zusatzparametern langjähriges Expertenwissen, vor allem, wenn es sich um fraktionierten Sedimenttransport handelt.

Als Alternative zu empirischen Transportformeln versprechen datengetriebene Modelle, wie etwa künstlich neuronale Netze, eine einfachere Handhabung und einen geringeren Berechnungsaufwand. Im Trainingsprozess erlernen die datengetriebenen Modelle aus einem zur Verfügung gestellten Datensatz dessen Charakteristiken und Verhaltensweisen nachzuahmen. Sie sind somit für die im Trainingsdatensatz enthaltenen Szenarien maßgeschneidert. Die Güte und das Spektrum des Trainingsdatensatzes entscheiden demnach über die Modellqualität. Erste Versuche, die morphologischen Entwicklungen direkt mit einem künstlich neuronalen Netz zu simulieren, verliefen erfolgreich (Kaveh, 2019). Allerdings musste aus Ermangelung an hochwertigen Trainingsdaten auf konventionelle numerische Simulationsergebnisse, denen die empirischen Formeln zu Grunde lagen, zurückgegriffen werden. Datengetriebene Modelle leben von den Trainingsdaten und können Prozesse nur dann wiedergeben, wenn diese auch von den Trainingsdaten beschrieben werden. Die aufwendige Vorbereitung, Trainingsdaten über komplexe und aufwendig zu kalibrierende numerische Modelle zu generieren, macht die Vorteile der datengetriebenen Modelle nur bedingt nutzbar. Um die Stärken von datengetriebenen Modellen auszuschöpfen, sind hochwertige Messdaten, die die Sohltopographie auf Einzelkornenebene zeitlich hochaufgelöst wiedergeben, erforderlich. In wasserbaulichen Versuchen wurden derart feine Messdaten bislang noch nicht erhoben und hier setzt diese Arbeit an.

## 1. Einleitung

In dieser Arbeit wird ein unterwasserphotogrammetrisches Verfahren zur Erfassung von Sohltopographien auf Einzelkornebene entwickelt, das im Stande ist, im laufenden Versuch zu vermessen. Der hohe Detaillierungsgrad erlaubt es, selbst kleinräumige Strukturen zu erkennen und bietet einen tiefen Einblick in die ablaufenden Transportprozesse an der Sohle. In hochaufgelösten Punktwolken werden exponiert gelegene Sedimentkörner direkt abgebildet. Die Unterwasseraufnahmen geben selbst feinste Bewegungen kleinster Körner zu erkennen. Perspektivisch lassen sich mit solchen Informationen neuartige datengetriebene Modelle entwerfen. Auch könnten bestehende sedimentologische Modelle weiter verbessert werden.

Die Erfassung der Sohltopographie auf Einzelkornebene stellt hohe Ansprüche an die eingesetzte Vermessungstechnik. Deshalb wurden im Rahmen von Vorversuchen, die mit studentischer Begleitung erfolgten, verschiedene Vermessungstechniken einem Praxistest unterzogen. Die Forderung der hohen räumlichen Auflösung konnte von mehreren Messverfahren problemlos erfüllt werden. Hingegen scheiterten fast alle Messverfahren als es um die geforderte hohe zeitliche Auflösung ging. Sie ist nur dann realisierbar, wenn die Sohle im laufenden Versuch vermessen werden kann. Aus den Vorversuchen ging die Unterwasser-Photogrammetrie als geeignetstes Messverfahren hervor, um in Bereichen mit hoher morphologischer Aktivität und bei stark gewelltem Abfluss Sohlvermessungen vornehmen zu können.

Die photogrammetrische Sohlvermessung im wasserbaulichen Versuchswesen ist ein noch recht junges Messverfahren. Im entleerten Zustand können photogrammetrische Systeme mit ihrem standardmäßig eingesetzten Einmedien-Modell, die eine Luftaufnahme voraussetzen, heutzutage ohne große Schwierigkeiten eine hochaufgelöste Rekonstruktion der Sohle durchführen. Erfolgen die Messungen im laufenden Versuch direkt durch die Wasseroberfläche hindurch oder unter Wasser aus wasserdichten Kameragehäusen heraus, so sind in beiden Fällen bei der nachfolgenden photogrammetrischen Auswertung die Brechungseffekte, die durch die Medienübergänge entstehen, mit zu berücksichtigen. Bei wasserbaulichen Anwendungen kommt es in der Regel zu maximal zwei Medienübergängen, von Luft zu Glas und Glas zu Wasser. Die damit verbundenen Brechungseffekte verursachen in den Unterwasseraufnahmen zusätzliche Bildverzerrungen, die mit konventionellen photogrammetrischen Modellen nur näherungsweise erfasst werden können. Die durch die Vorsatzlinsen verursachten Bildverzerrungen unterliegen einer starken Abstandsabhängigkeit. Zudem kann es im Fall von hemisphärischen Linsen zu Sonderformen der Verzerrungen kommen, die vom Standard-Verzerrungsmodell nicht abgedeckt sind. Werden konventionelle Einmedien-Modelle unter Wasser eingesetzt, so liefern sie nur vorbehaltlich einer Unterwasserkalibrierung, die die exakt gleichen Abstände der späteren Aufnahmen nutzt, korrekte Ergebnisse. Dies ist in der Praxis schwer umzusetzen. Die Verzerrungen hängen sowohl von der Objektentfernung als auch dem Ort des Medienübergangs ab. Für hochwertige Unterwasser-Rekonstruktionen sind die Unterwasser-Verzerrungen entweder durch eine Datenaufbereitung aus den Bildern zu entfernen oder durch ein Mehrmedien-

## 1. Einleitung

Modell direkt bei der Auswertung zu berücksichtigen. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Verfahren zur Bildaufbereitung entworfen, das die Unterwasseraufnahmen so entzerrt, dass diese mit einem konventionellen photogrammetrischen Verfahren fehlerfrei verarbeitet werden können. Die überwiegende Mehrzahl der bislang veröffentlichten unterwasserphotogrammetrischen Arbeiten schenkt den abstandsabhängigen Verzeichnungen kaum Beachtung, meist wird sie einfach den Objektivverzeichnungen zugeschlagen, ohne sie genauer zu quantifizieren. Die Ausführungen zur Abstandsabhängigkeit zeigen, dass diese durchaus ins Gewicht fallen können. Für zukünftige Projekte sollte bereits in der Konzeptionsphase geprüft werden, ob die Abstandsabhängigkeit von Relevanz ist.

Der optische Zugang des photogrammetrischen Systems wurde im Rahmen dieser Arbeit über hemisphärische Vorsatzlinsen realisiert. Bei dieser Art von Trennflächen verschwinden die Brechungseffekte, sofern die Lage des Zentrums mit der Eintrittspupille des Objektivs koinzidiert. Die Erfahrungen aus der praktischen Umsetzung lehren, dass eine perfekte Koinzidenz fertigungsbedingt nicht zu erreichen sein wird, sie aber durch das vorgestellte Verfahren zur Zentrumseinrichtung bis auf wenige zehntel Millimeter hergestellt werden kann. Die Feinjustierung der Zentren reduzierte die durch die Vorsatzlinsen verursachten Verzeichnungen auf wenige Pixel und trug maßgeblich zur Bild- und Modellqualität bei.

Die begleitenden praktischen Versuche dieser Arbeit fanden an der Versuchsanstalt Obernach der Technischen Universität München statt. Dort wurde ein kleiner Versuchstand so ausgerüstet, dass Versuche mit beweglicher Sohle und unterschiedlichen Einbauten gefahren werden konnten. Bei der photogrammetrischen Vermessung der Sohle wurden vier synchronisierte Industriekameras eingesetzt, die in einem mit einer hemisphärischen Vorsatzlinse bestückten Unterwassergehäuse saßen und von dort aus Unterwasseraufnahmen der Sohle anfertigten. Zur Auswertung durchliefen die Unterwasseraufnahmen ein spezielles mehrstufiges Vorgehen, das schrittweise die Unterwassereffekte aus den Bildern entfernte. Auf Grundlage der korrigierten Unterwasseraufnahmen konnte eine hochaufgelöste Punktwolke rekonstruiert werden, die die Sohltopographie auf Einzelkornebene wiedergab. In weiteren Verarbeitungsschritten entstanden aus der hochaufgelösten Punktwolke ein räumlich vernetzte Darstellung der Sohle, ein digitales Geländemodell und zusammen mit den Bildern ein Orthophoto.

Die erhobenen Bilddaten und die rekonstruierte Sohltopographie liefern ein digitales Abbild der Sohle. Um daraus einen wasserbaulichen Mehrwert zu generieren, werden verschiedene wasserbauliche Veredelungsprodukte, die relevante Prozessdaten aus den Bild- und Vermessungsdaten extrahieren, andiskutiert.

## 2. Sedimentologische Datenerhebung

Physikalische Modellversuche und Feldmessungen sind für die Erforschung der morphologischen Transportvorgänge und Erhebung sohlmorphologischer Daten unentbehrlich. Bis dato sind die ablaufenden Transportprozesse und die Interaktion mit der umgebenden Wasserphase zu komplex, als dass sie rein analytisch oder numerisch gelöst werden könnten. Die Kunst bei physikalischen Modellversuchen mit beweglicher Sohle besteht darin, die Naturvorgänge korrekt ins Modell zu übertragen und das Geschehen dort engmaschig genug zu erfassen. Bei der Übertragung vom Naturmaßstab in den Modellmaßstab helfen Ähnlichkeitsmodelle mit ihren dimensionslosen Kennzahlen (Dorer, 1984). Zur Erfassung der morphologischen Vorgänge werden üblicherweise die Wasserstände, Sohlagen, teilweise auch die Kornverteilung und in einigen Fällen sogar die Geschwindigkeitsfelder an verschiedenen Orten zu unterschiedlichen Zeitpunkten erhoben. Je nach eingesetzter Messtechnik, gewünschter Messauflösung und geplanter zeitlicher Auflösung, wächst der messtechnische Aufwand schnell an. Insbesondere, wenn zur Datenerhebung die Versuche erst vorsichtig trockengelegt und anschließend wieder befüllt werden müssen. Mit den erhobenen Messdaten können morphologische Gesetzmäßigkeiten abgeleitet werden, die beispielsweise Transportraten, Sortierungseffekte, Einkolkttiefen oder Erosions- und Auflandungsraten quantifizieren.

Um eine Vorstellung des Aufwandes von sohlmorphologischen Untersuchungen zu bekommen, sind hier im Folgenden stellvertretend einige Versuchsreihen genannt. Mit umfangreichen und systematischen Untersuchungen zum Transportverhalten von Einkornmaterial an der ETH Zürich (Müller, 1943) gelang es eine Transportformel für im Gleichgewicht befindlichen Sedimenttransport zu formulieren (Meyer-Peter und Müller, 1949). Die Transportformel von Meyer-Peter und Müller bildet bis heute die Grundlage vieler numerischer Geschieberegungsmodelle, obgleich nur allzu oft die Anwendungsgrenzen, die durch die im Versuch eingestellten Gleichgewichtszustände gesteckt sind, nicht eingehalten werden. In den Versuchen von Meyer-Peter und Müller wurde die Sedimentzugabe für unterschiedliche, während eines Versuches konstant gehaltene Abflüsse so eingeregelt, dass der Austrag aus der Versuchsrinne dem Eintrag entsprach und sich damit im Gleichgewicht befand. Für jeden experimentell gefundenen Gleichgewichtszustand sind am Ende der Versuchsreihe die mittleren Wasserspiegel- und Sohlagen sorgfältig aufgemessen worden, woraus später die Meyer-Peter und Müller Formel abgeleitet werden konnte. Nicht weniger aufwendig gestalteten sich die Untersuchungen von Shields (1936), der den Bewegungsbeginn von unterschiedlichen Sohlmaterialien über zahl-

## 2. Sedimentologische Datenerhebung

reiche Versuche experimentell ermittelte, von Günter (1971), der den Korngrößenabhängigen Bewegungsbeginn und die damit verbundenen Sortierprozess studierte, oder von Yen und Lee (1995), die die Umlagerungs- und Sortierprozesse in gekrümmten Flussverläufen untersuchten. Die Sohlhöhen und Wasserstände dieser Versuche mussten über Stechpegel aufgemessen werden, wodurch die räumliche und zeitliche Auflösung stark limitiert war. Zur Bestimmung der Kornverteilungen wurden die Deckschichten mit flüssigen Wachsen oder Harzen begossen, die wieder abgekühlt die Sohle temporär fixierten, so dass sie vorsichtig unter Wasser entnommen werden konnten. Nach der Entnahme der erstarrten Platte wurde das Wachs oder Harz wieder verflüssigt oder aufgelöst. Somit konnten die Gesteinskörner für weitere Analysen freigelegt werden (Günter, 1971).

Zeitraubende händische Messverfahren konnten mit Einzug der Digitalisierung, Anfang der 90er, teilweise vereinfacht oder durch neue Verfahren ergänzt bzw. ersetzt werden. Mit der Übernahme von Messmethoden aus anderen Disziplinen war es in den Anfängen der Digitalisierung oftmals noch notwendig, das Versuchsgerinne trocken zu legen. Durch Weiterentwicklungen konnten die Messverfahren unterwassertauglich gemacht werden (Butler et al., 2002, Godding et al., 2003). Über die Jahre hinweg wurden die räumliche und zeitliche Auflösung der Messverfahren sukzessive gesteigert. Im gleichen Maße wuchsen die zu verarbeitenden Datenmengen, die eigens dafür konzipierte Auswertetechniken verlangen. Moderne Mess- und Auswertetechniken machen die komplexen Transportvorgänge selbst auf der Ebene eines Einzelkorns sichtbar (Radice et al., 2008, Shim und Duan, 2017). Das daraus gewonnene Prozessverständnis kann in die Verbesserung bestehender Modelle einfließen oder zur Konzeption neuer Ansätze, wie beispielsweise datengetriebene Modelle, genutzt werden.

In den physikalischen Versuchen und Feldmessungen werden heutzutage schwerpunktmäßig die Sohlveränderungen, die Kornverteilung, der Bewegungsbeginn und die angreifenden Kräfte aufgezeichnet. Im Nachfolgenden sind die messtechnischen Verfahren, die in der Lage sind Sohltopographien aufzunehmen, zusammengestellt und hinsichtlich ihrer Eignung zur Erfassung von Sohltopographien auf Einzelkornebene bewertet. Folgend sind die photogrammetrischen, Laufzeitmess-, hydroakustischen, radiologischen, und Druckmess-Verfahren einzeln kurz beschrieben.

### 2.1. Photogrammetrische Verfahren

Photogrammetrische Verfahren rekonstruieren aus Bildern eines Objekts, die von unterschiedlichen Standpunkten aus aufgenommen sind, dessen räumliche Lage und Form. Ist die Sicht nicht durch Schwebstoffe gestört, sind Unterwasser-Rekonstruktionen selbst über größere Distanzen, bis hin zu einigen Metern, problemlos möglich (Jordt, 2014, Menna et al., 2018). Für

## 2. Sedimentologische Datenerhebung

quantitativ belastbare Unterwasser-Rekonstruktionen sind die Brechungseffekte im Modell zu berücksichtigen, damit Genauigkeiten von wenigen Millimetern erreicht werden können (Butler et al., 2002). Die Stärke von photogrammetrischen Systemen kann vor allem bei der Erfassung dynamischer Szenen, wie sie etwa bei Geschiebetransportvorgängen zu beobachten sind, ausgespielt werden. Mit den synchronisierten Aufnahmen eines Mehrkamerasystems, die zeitgleich und von unterschiedlichen Standpunkten aus den Sohlzustand ablichten, ist die Sohldynamik erfassbar. Zusätzlich kann über die Aufnahmen des Mehrkamerasystems eine Messung der Geschwindigkeitsfelder mittels Particle Tracking Velocimetry, kurz PTV, vorgenommen werden (Godding et al., 2003). Die Auswertung von Mehrbildsystemen zur Objektrekonstruktion läuft heutzutage in der Regel über Structure-from-Motion, kurz SfM, Verfahren, die aus einer Bildfolge eines Objekts dessen räumliche Lage und Form rekonstruieren. Moderne SfM-Verfahren sind derart robust, dass sie selbst Unterwasseraufnahmen anstandslos verarbeiten und daraus optisch ansprechende Modelle zaubern, die allerdings schwer erkennbare systematische Fehler beinhalten. Dies verleitet dazu, die Software ohne allzu großen Bedacht einzusetzen. In den Anfängen dieser Arbeit wurde ebenfalls mit den Möglichkeiten der Photogrammetrie experimentiert. Relativ schnell konnte aus Unterwasseraufnahmen ein auf den ersten Blick gut aussehendes Modell erstellt werden. Die rekonstruierten Oberflächen zeigten keine Auffälligkeiten, die Form entsprach optisch den Gegebenheiten im Gerinne. Erst die Gegenüberstellung von Unterwasser- und Luft-Rekonstruktion ließ Unterschiede erkennen, die lokal mitunter stark variierten. Vor allem Bereiche mit komplizierter Sohltopographie, wie etwa steile Hänge, offenbarten große Abweichungen. Um detailgetreue und hochgenaue virtuelle Modelle aus den Bilddaten abzuleiten sind demnach spezielle Vorkehrungen vorzunehmen.

Strukturierte Lichtverfahren, als eine Spezialform der Photogrammetrie, projizieren Muster auf die Objektoberflächen. Dazu nehmen schräg angeordnete Kameras diese Muster abhängig von Objektentfernung und Ausrichtung der Oberflächen unterschiedlich stark verzerrt wahr. Zur Objektraumrekonstruktion werden aus den Verzerrungen die Tiefeninformationen rückgerechnet. In Vorversuchen mit dem *DAVID SLS-3* System, einem strukturiertem Lichtverfahren aus dem Privatanwenderbereich, konnte die grundsätzliche Unterwassereignung nachgewiesen werden (Desch, 2015). Der Versuch wurde zur Sohlvermessung angehalten, das Wasser aber nicht abgelassen. Das *DAVID SLS-3* System projiziert mehrere, immer feiner werdende Muster auf die Sohloberfläche, was wenige Sekunden in Anspruch nimmt. Softwareseitige Eingriffe zur Brechkorrektur konnten nicht vorgenommen werden, weshalb die Ergebnisse unter starken Verzerrungen litten. Die Bundesanstalt für Wasserbau hat in Zusammenarbeit mit der Firma *AI-CON* ein strukturiertes Lichtverfahren für den Unterwassereinsatz zur Einsatzreife in der Forschung entwickelt, das näher in Kapitel 3 vorgestellt wird. Auch die *Kinect* von *Microsoft* arbeitet mit strukturiertem Licht. Sie erzeugt über eine Diffraktionsoptik, eine Art Mini-Lochbleche, pseudo-zufällige Infrarotmuster mit eindeutig zuordenbaren Mustern, welche dem menschl-

## 2. Sedimentologische Datenerhebung

chen Auge aufgrund der Wellenlänge verborgen bleiben. Die Tiefeninformation errechnet die *Kinect* aus den Lageverschiebungen der Muster, die sich zwischen den Aufnahmen der Infrarotkamera und den werksseitig hinterlegten Kalibrierungsdaten ergeben. Vorversuche zeigten, dass die *Kinect* die Sohle im trockenen Zustand gut erfasst (Liepert et al., 2016). Bei Unterwasseranwendungen liefert die *Kinect* hingegen aufgrund der fehlenden Brechkorrektur stark verzerrte Ergebnisse (Dancu et al., 2014). Zudem erfährt das Infrarotmuster im Wasser eine starke Dämpfung, was den Messbereich auf maximal 30 cm beschränkt (Dancu et al., 2014).

Das am Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung in Stuttgart entwickelte *PHOTOgrammetric SEDiment Erosion Detection* Verfahren vermisst zeitlich hochaufgelöst (10 Hz) die Oberfläche einer kohäsiven Sedimentprobe, die bodenbündig in einem geschlossenen Strömungskanal eingebaut und während des Versuchs durch eine Verfahreinrichtung nachgeführt wird. Der optische Zugang erfolgt von oben durch die Plexiglaswandung des geschlossenen Strömungskanals hindurch. Das Messverfahren projiziert über eine Diffraktionsoptik ein pseudozufälliges Muster schräg auf die Sedimentprobe, das von einer senkrecht über der Probe angeordneten Kamera aufgenommen wird. Erosionen in der Probenoberfläche lassen die von der Kamera wahrgenommenen Muster verschoben erscheinen. Verfahren zur Bestimmung des optischen Flusses berechnen hieraus die Sohlveränderungen und Erosionsraten. Die Brechungseffekte werden über die Kalibrierung gedämpft (vgl. Noack et al., 2018).

Die an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich entwickelte Software *BASEGRAIN* ist im Stande aus Bildern der Sohloberfläche die Kornverteilung zu ermitteln (Detert und Weitbrecht, 2012). Hierfür nutzt *BASEGRAIN* die Linienzahlanalyse, die entlang einer Auswertegeraden die kleinere Achse der als Ellipsen angenäherten Steine vermisst und daraus über das Verfahren nach Fehr (1987) die Kornverteilung ableitet. Die photogrammetrische Bildverarbeitung in *BASEGRAIN* digitalisiert den Vermessungs- und Auswerteprozess vollständig und spart so erheblich Zeit ein. Anwendungen zeigen, dass die robuste Bildverarbeitung die Sedimentkörner zuverlässig in den Bilddaten erkennt, selbst wenn es sich um Unterwasseraufnahmen handelt (Rüther et al., 2013).

Photogrammetrische Verfahren besitzen bei entsprechender Ausgestaltung (richtige Brennweite, Korrektur der Brechungseffekte und hochwertige Unterwasseraufnahmen) das Potential die Sohltopographie auf Kornebenen zu erfassen. Bislang beschränkt sich der Einsatz von hochgenauen, brechungskorrigierten Verfahren auf vergleichsweise große Gebiete, die mehrere Quadratmeter erfassen (Godding et al., 2003). Um die einzelnen Sedimentkörner auflösen zu können, ist der Ausschnitt auf wenige Quadratdezimeter zu reduzieren. Die größte Stärke gegenüber anderen Verfahren ist, dass die Vermessung flächig und instantan realisierbar ist. Dies bietet enorme Vorteile, wenn es um die Nachverfolgung von bewegten Objekten geht.

### 2.2. Laufzeitmessverfahren

Lichtlaufzeit-Messverfahren ermitteln über Phasendifferenz- und/oder Impulslaufzeit-Messverfahren die Laufzeit des Messsignals. Moderne 3D-Laserscanner kombinieren oftmals beide Messverfahren, wodurch sie hohe Messfrequenzen bei geringem Distanzrauschen erzielen (Luhmann, 2018). Die hohen Abtastraten moderner Laserscanner erlauben großflächige Aufnahme mit Millionen von Punkten, die innerhalb weniger Minuten aufgemessen werden (Friedl et al., 2018). Mehrmedien-Messungen, bei denen durch die Wasseroberfläche hindurch gemessen und eine Brechungskorrektur vorgenommen wird, zeigen bei ruhiger Wasseroberfläche eine Messgenauigkeit von 1,4 mm (Friedl et al., 2018). An ein Flugzeug montiert helfen Laserscanner bei der luftgestützten Gewässerbettvermessung. Das an der Uni Innsbruck in Zusammenarbeit mit *Riegl Measurement Systems GmbH* entwickelte *Airborne HydroMapping* System erfasst die Landoberfläche und das Gewässerbett in einem Zug. Brechungseffekte sind im Verfahren berücksichtigt (Steinbacher et al., 2010, Aufleger et al., 2015). Die *Kinect 2* von *Microsoft*, die Nachfolgerin der *Kinect*, arbeitet nach dem Prinzip der Lichtlaufzeitmessung. Sie nutzt einen Infrarotlaser, der im Wasser stark gedämpft wird (Tsui et al., 2014). Ohne Brechungskorrektur weichen die Messungen der *Kinect 2* beim Einsatz unter Wasser um bis 40 % ab (Tsui et al., 2014). Einem speziell für den Unterwassereinsatz der *Kinect 2* konzipierten Auswertevorgehen gelingen Unterwasserrekonstruktionen mit einer Genauigkeit von  $\pm 6$  mm (Anwer et al., 2017).

Laserscanner, wie sie bei Friedl et al. (2018) zum Einsatz kamen, sind nicht dazu konzipiert, im Nahbereich sehr filigrane Strukturen aufzunehmen. Zur hochaufgelösten Erfassung der Sohltopographie wären spezielle Linienlaser heranzuziehen und mit einer Brechungskorrektur auszustatten. Da die Entfernungsmessung bei Laufzeitmessverfahren in der Regel Punkt für Punkt und nicht flächig erfolgt, kommt es bei bewegten Objekten zu Artefakten, die der Aufnahmetechnik zuzuschreiben sind. Wären beispielsweise die Geschwindigkeit des Sedimentkorns und die Aufnahmegeschwindigkeit identisch, so würde das Sedimentkorn als ein langgezogener Stein in Erscheinung treten. In der Praxis erscheinen bewegte Objekte deformiert bzw. verzerrt, das verkompliziert die Auswertung des dynamischen Sohlverhalten, weshalb von Laufzeitmessverfahren Abstand genommen wurde.

### 2.3. Hydroakustische Verfahren

Hydroakustische Messsysteme senden Schallwellen aus, um Objekte zu detektieren oder deren Geschwindigkeit zu messen. Die Schallwellen durchlaufen die Wassersäule, bis sie auf im Wasser befindliche Objekte oder die Sohle treffen und dort von ihnen reflektiert werden. Eine

## 2. Sedimentologische Datenerhebung

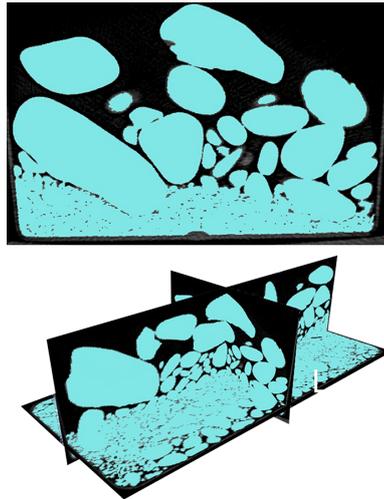
Empfängereinheit zeichnet die zurück geworfenen Schallwellen auf und wertet die Signallaufzeit aus. Mit der Schallgeschwindigkeit von Wasser, die eine Funktion des Salzgehalts und der Temperatur ist, kann über die gemessene Laufzeit die zurückgelegte Distanz berechnet werden. Fächerecholote setzen gleichzeitig mehrere Bündel mit mehreren Signalen ein, die die Sohle mit ihren aufgefächerten Signalen bei einer Überfahrt streifenweise erfassen (vgl. Wessels et al., 2013). Fächerecholotmessung werden unter anderem an den Bundeswasserstraßen zur regelmäßigen Kontrolle der Fahrrinne eingesetzt. Medizinische Ultraschallgeräte erfassen zusätzlich zur Laufzeit die Signalstärke, auf dessen Grundlage die bekannten Ultraschallbilder der Ungeborenen entstehen. Sohlrekonstruktionen mittels medizinischer Ultraschallgeräte erlauben eine Genauigkeit von 1 mm (Zou et al., 2015). Acoustic Doppler Current Profiler, kurz ADCP, nutzen zur Ermittlung der Geschwindigkeitsverteilung ein auf dem Dopplereffekt beruhendes akustisches Verfahren. Treffen die vom ADCP ausgesandten Schallwellen auf sich bewegende Partikel, ändert sich je nach Bewegungsrichtung der Partikel die Wellenlänge der zurück gesandten Schallwellen. Die Änderung der Wellenlänge ist proportional zur Geschwindigkeit der Partikel. ADCP Systeme eignen sich auch zur Erfassung der Gewässerbettgeschwindigkeiten (Conevski et al., 2017).

Das Auflösungsvermögen von hydroakustischen Verfahren dürfte zur Erfassung einzelner kleinen Sedimentkörner unter Umständen gerade so ausreichen. Für flächige Aufnahmen verschwenken die Sensorköpfe die Messsensorik, so dass es zu einem geringen zeitlichen Versatz kommt, der bei bewegten Objekten Deformationen bzw. Verzerrung hervorruft. Für die Nachverfolgung von einzelnen Sedimentkörnern sind hydroakustische Verfahren bislang nicht geeignet.

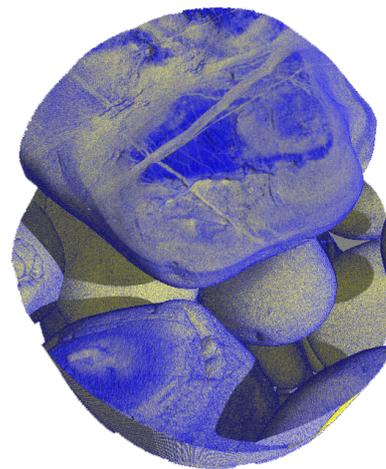
### 2.4. Radiologische Verfahren

In der medizinischen Radiologie ist die Computertomographie, kurz CT, ein etabliertes bildgebendes Verfahren. Die CT-Geräte schicken Röntgenstrahlen durch Objekte hindurch und zeichnen auf der gegenüberliegenden Seite die durch die Durchdringung abgeschwächten Signale auf. Die Abschwächung bzw. Absorption der Röntgenstrahlen ist proportional zur Dichte der durchdrungenen Materialien, je höher die Dichte desto mehr Strahlung wird absorbiert. In modernen CT-Geräten erfolgen mehrere Einzelaufnahmen von unterschiedlichen Standpunkten aus, aus denen spezielle Verfahren die räumliche Verteilung der Absorptionskoeffizienten errechnen. Das Ergebnis ist ein Voxel-Feld (volumetrisches Pixel-Feld) der gemessenen Absorptionskoeffizienten. Durch eine Weiterverarbeitung können Bereiche gleicher Absorption identifiziert und als räumliche Objekte extrahiert werden. Im Rahmen von Vorversuchen, die von zwei Abschlussarbeiten begleitet wurden, ergab sich die Gelegenheit an zwei unterschiedlichen CT-Geräten Aufnahmen von Sohlproben anzufertigen. Zum einen an einem medizinischen CT-Gerät, das eine anisotrope Voxel-Auflösung von  $0,25 \times 0,25 \times 0,67\text{mm}$  besaß (Bolik, 2014),

## 2. Sedimentologische Datenerhebung



(a) Klinisches CT - Bolik (2014)



(b) Forschungs-CT- Holland (2015)

Abbildung 2.1.: Radiologische Sohlaufnahme eines klinischen CTs in 2.1a und eines Forschungs-CTs in 2.1b. In den Aufnahmen des klinischen CT verschmelzen die Sedimentkörner an ihren Kontaktflächen. Mit dem Forschungs-CT kann die Dichteveriation eines Kornes sichtbar gemacht werden, die Farbgebung in 2.1b erfolgte anhand des Absorptionskoeffizienten

und zum anderen an einem Forschungs-CT mit einer isotropen Voxel-Auflösung von 0,1 mm (Holland, 2015). Die Auswertungen der medizinischen CT-Aufnahme zeigen einen klaren Unterschied zwischen Wasser und Gestein, jedoch verschmelzen die Einzelkörner an den Kontaktflächen, siehe Abbildung 2.1a. Mit dem CT-Verfahren kann so das Porenvolumen quantifiziert werden (Peyton et al., 1992). In den medizinischen CT-Aufnahmen sind alle Sedimentkörner durch den gleichen Absorptionskoeffizienten repräsentiert. Das Forschungs-CT war in der Lage, die Dichteveriation innerhalb eines Kornes herauszuarbeiten, siehe Abbildung 2.1b. Für die angestrebte Einzelkornextraktion war dies jedoch wenig hilfreich, da die Variation der Dichte innerhalb eines Kornes und zwischen den einzelnen Körnern in etwa gleich groß ist.

Der Einsatz von CT-Geräten wäre insofern lohnenswert, da nicht nur die Oberfläche, sondern auch die Untersicht und deren Zusammensetzung sichtbar gemacht werden könnten. Allerdings dürfen sich auch hier die Objekte während der Aufnahme nicht bewegen.

### 2.5. Druckmessverfahren

Das von Curran et al. (2015) entwickelte *Bed Load Monitoring System* misst kontinuierlich für diskrete Abschnitte eines Versuchskanals das Wasser- und Sedimentgewicht und ermittelt daraus die Sohlumlagerungsprozesse. Für die Gewichtsmessung wurde das Gerinne in  $1,0 \times 0,6$  m

## 2. Sedimentologische Datenerhebung

große Messabschnitte unterteilt und mit Messplatten, die auf wassergefüllten Schläuchen lagerten, ausgestattet. An den wassergefüllten Schläuchen angeschlossene Druckmessdosen zeichneten das dynamische Druckverhalten auf. Zusammen mit den Wasserstandsmessungen konnte hieraus das Wasser- und Sedimentgewicht für jeden Messabschnitt bestimmt werden. Die Stärke dieser Methodik ist, dass sie keinen optischen Zugang benötigt. Ergänzend fanden hochauflösende Linienlasermessungen statt, die der Kalibrierung dienten, wofür das Gerinne jedoch vorsichtig trockengelegt werden musste (vgl. Curran et al., 2015).

Zur Erfassung der angreifenden Kräfte nahmen Spiller et al. (2012) einen Abdruck einer abgeplatteten Sohle und erstellte daraus Kunststoffduplikate. Der Einbau in einen mit Particle Image Velocimetry, kurz PIV, ausgestatteten Strömungskanal ermöglichte die Messung von sohnahen Geschwindigkeiten. Zur Messung der angreifenden Kräfte wurde aus einem Kunststoffduplikat der Sohle ein kleiner Ausschnitt herausgelöst und auf einer Druckmessdose beweglich gelagert, wodurch die am Ausschnitt angreifenden Kräfte gemessen werden konnten (vgl. Spiller et al., 2015).

Druckmessverfahren erfassen die Veränderungen der Sohltopographie indirekt über deren Gewicht. Aussagen zu Form von einzelnen Körnern werden sich daraus nicht ableiten lassen, weshalb die Erfassung auf Einzelkornebenen mit diesem Verfahren ausgeschlossen ist.

### 2.6. Zusammenfassung

Aus den Vorversuchen, die von zahlreichen studentischen Arbeiten begleitet wurden, Rochlus (2014), Bolik (2014), Balzer (2015), Holland (2015), Kleiber (2015), Maral (2015), von der Straten (2015), Weiß (2015), Wittlinger (2016), Warmedinger (2017), Schmelz (2018), Schmölzl (2018), Heigermoser (2020), kristallisierte sich nach und nach die Photogrammetrie als das geeignetste Verfahren heraus, um räumlich und zeitlich hochaufgelöste sohltopographische Daten zu erheben. In erster Linie hebt sich die Photogrammetrie durch ihre Fähigkeit, flächig und instantan Messdaten zu erheben, von den anderen Messverfahren ab, was gerade im Hinblick auf die Nachverfolgung von Einzelkornbewegungen einen entscheidenden Vorteil bringt.

Das in dieser Arbeit entwickelte Messsystem ist für kleinräumige Situationen mit stark ausgeprägten Oberflächenwellen gedacht, wie sie beispielsweise bei einer Bauwerksumströmung auftreten. Der Anspruch ist es, dort qualitativ und quantitativ hochwertige Daten auf Einzelkornebene zu erheben, die auf jeden Fall eine Korrektur der Brechungseffekte erfordern.

Softwaretechnische Realisierungen bereits publizierter unterwasserphotogrammetrischer Ansätze standen auch nach intensiver Recherche nicht zur Verfügung. Veröffentlichungen, die das Problem grundsätzlich angehen, hätten die Programmierung eines kompletten Photogrammetrie-Systems erfordert, was qualitativ nie an kommerzielle Produkte hätte heranreichen können.

## *2. Sedimentologische Datenerhebung*

Bereits laufende Systeme wurden von den Autoren nicht herausgegeben. Selbst auf Anfrage hin, blieb der Zugang zum vielversprechendsten System von Jordt (2014) aus lizenzrechtlichen Gründen verwehrt. Um für die notwendigen Eigenentwicklungen nicht vom Reißbrett aus starten zu müssen, wurde auf eine gewinnbringende Verschaltung von leistungsstarken OpenSource Programmbibliotheken und kommerziellen Softwareprodukten gesetzt. So profitiert diese Arbeit von den Fortschritten, die in den letzten Jahrzehnten auf dem Feld der Photogrammetrie erreicht wurden.

Im nachfolgenden Kapitel werden die photogrammetrischen Verfahren ausführlich erläutert und dabei wird detailliert auf deren Mehrmedieneinsatz eingegangen.

### 3. Photogrammetrie

Die Photogrammetrie ist im Stande, aus Bildern eines Objekts berührungslos dessen Form und Größe abzuleiten. Die Rekonstruktion basiert in aller Regel auf einem zentralperspektivischen Ansatz, der über in- und extrinsische Parameter den Bezug zwischen Bild- und Objektraum herstellt, siehe Abbildung 3.1a. Die Kollinearitätsgleichungen sind die mathematische Formulierung der Zentralperspektive (vgl. Luhmann, 2018).

$$\begin{aligned}x'_p &= x'_0 + z' \frac{r_{11}(X - X_{O'}) + r_{21}(Y - Y_{O'}) + r_{31}(Z - Z_{O'})}{r_{13}(X - X_{O'}) + r_{23}(Y - Y_{O'}) + r_{33}(Z - Z_{O'})} + \Delta x' \\y'_p &= y'_0 + z' \frac{r_{12}(X - X_{O'}) + r_{22}(Y - Y_{O'}) + r_{32}(Z - Z_{O'})}{r_{13}(X - X_{O'}) + r_{23}(Y - Y_{O'}) + r_{33}(Z - Z_{O'})} + \Delta y'\end{aligned}\quad (3.1)$$

Sie verknüpfen die Objekt-  $(X, Y, Z)$  und Bildraumkoordinaten  $(x'_p, y'_p)$  über die innere und äußere Orientierung. Der Kamera- und Objektivaufbau ist durch die innere Orientierung mit ihren intrinsischen Parametern, der Kamerakonstante  $c$ , dem Bildhauptpunkt  $x'_0, y'_0$  und den Objektivverzeichnung  $\Delta x, \Delta y$  charakterisiert. Die äußere Orientierung beschreibt die räumliche Ausrichtung der Kamera durch die extrinsischen Parameter, der Lage des Projektionszentrums  $O'$  und der Verdrehungsmatrix  $R$  (vgl. Luhmann, 2018).

Die Anzahl an ins Verfahren gegebenen Bilder entscheidet darüber, ob es sich um Einzel-, Stereo-, oder Mehrbildauswertesysteme handelt. In der Praxis verschwimmen die Grenzen, da sich die Verfahren gegenseitig befruchten und deshalb oft Mischformen zum Einsatz kommen. Einzelbildauswertesysteme dienen beispielsweise der Detektion von Zielmarken, Bestimmung von Verzeichnungseffekten oder digitalen Entzerrung von Bildern. Stereo- und Mehrbildauswertesysteme können darüber hinaus eine räumliche Rekonstruktion von Objekten anfertigen (vgl. Luhmann, 2018).

Für die räumliche Rekonstruktion ist zuallererst das Korrespondenzproblem zu lösen, welches in den beteiligten Bildern nach identischen Bildpunkten sucht und diese einander zuordnet. Im Anschluss erfolgt die Orientierung der Bilder, die entweder vorgelagert oder simultan im Verfahren stattfinden kann. Bei einer simultanen Mehrbildeinpassung werden über ein Bündeltriangulationsverfahren beliebig viele Bilder unter Berücksichtigung der gefundenen Korrespondenzen sowie etwaiger Informationen aus einem übergeordneten Koordinatensystem zueinander eingepasst, siehe Abbildung 3.1b. Die Bündeltriangulation gleicht die Kameraausrichtungen so aus, dass sich die Strahlen der Passpunkte möglichst in einem Punkt schneiden. Somit liefert

### 3. Photogrammetrie

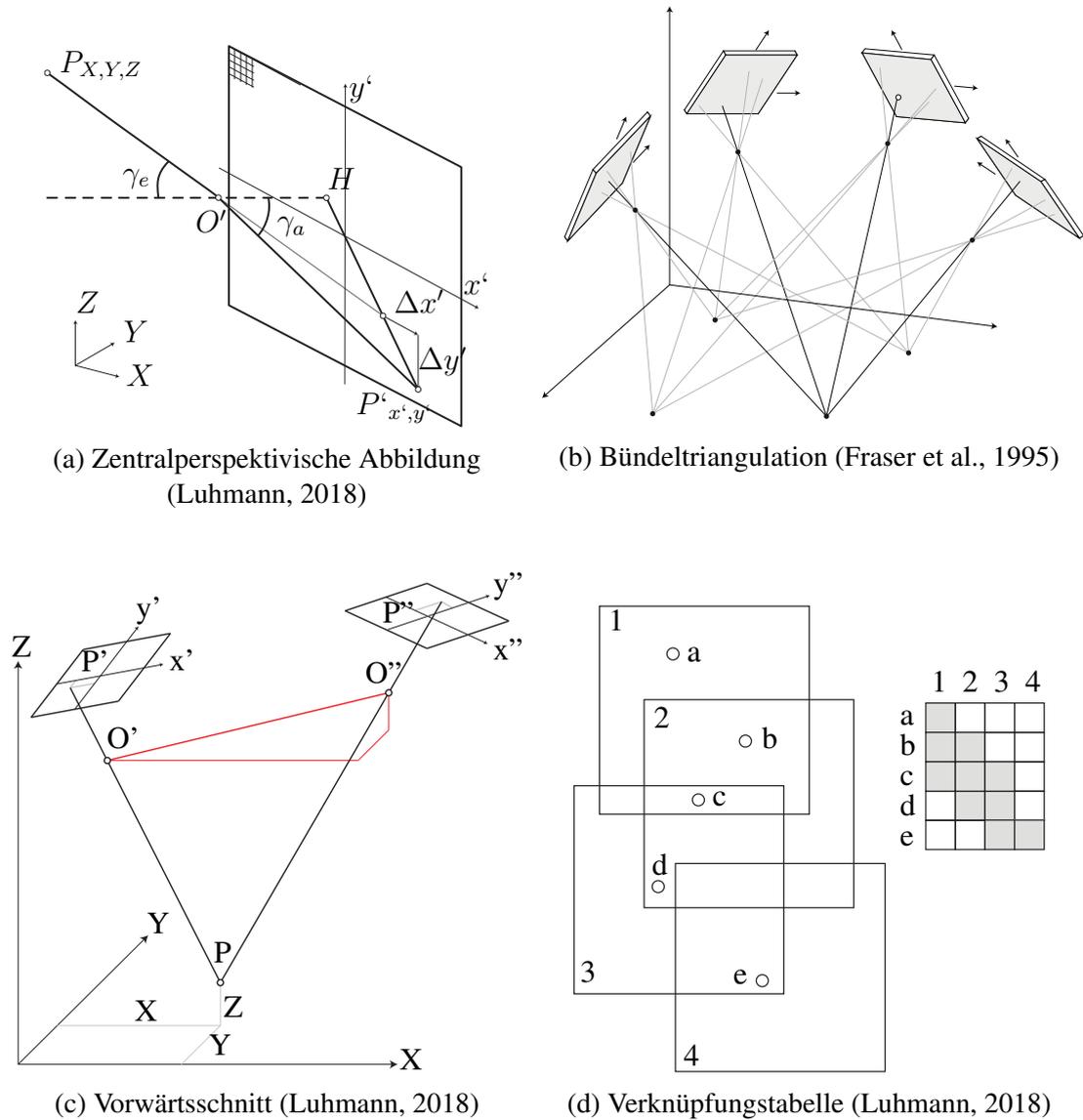


Abbildung 3.1.: Erläuterungsgrafiken zur Photogrammetrie

die Bündeltriangulation eine dünne Punktwolke und die Kamerapositionen sowie deren Blickrichtungen. Die nun bekannten inneren und äußeren Orientierungswerte erlauben, es über eine Verschneidung von korrespondierenden Strahlwegen die exakte Objektraumlage eines Punktes zu rekonstruieren. Für die auch als räumlicher Vorwärtsschnitt bezeichnete Verschneidung kommen stereometrische Triangulationsverfahren, siehe Abbildung 3.1c, oder eine Bündelblocktriangulationen zum Einsatz (vgl. Luhmann, 2018).

#### 3.1. Structure-from-Motion

Enorme Fortschritte im Bereich des Computersehens haben unter anderem die Mehrbildauswertetechnik Structure-from-Motion, kurz SfM, auf eine Entwicklungsstufe gehoben, die räumliche Rekonstruktionen spielend einfach gelingen lässt. Das SfM-Verfahren kombiniert verschiedene Bildverarbeitungstechniken, robuste Orientierungsalgorithmen und simultankalibrierte Bündelausgleichsrechnungen mit Stereobildmessungen. Die SfM-Technik ist in der Lage, aus einer Folge von ungeordneten Bildern eines nicht kalibrierten Aufnahmesystems eine räumliche Rekonstruktion der Aufnahmeszene zu erstellen (vgl. Luhmann, 2018).

Bei Beginn des SfM-Prozesses durchlaufen alle Bilder einen sogenannten Interest-Operator. Er arbeitet Bildmerkmale mit ihren Kenngrößen heraus, die sich in der lokalen Varianz, lokalen Einzigartigkeit, Krümmung der Grauwertoberfläche, Gradienten oder der lokalen Grauwertverteilung unterscheiden. Im nächsten Schritt ist das Korrespondenzproblem zu lösen, indem die identifizierten Merkmale der unterschiedlichen Bilder einander zugeordnet werden. Das Ergebnis der Zuordnung wird in einer Verknüpfungstabelle zusammengetragen, exemplarisch dargestellt in Abbildung 3.1d. Selbst modernste Zuordnungsalgorithmen können nicht sicherstellen, dass die Zuordnung fehlerfrei ist. Weshalb für die relative Orientierung, die auf Basis der Merkmalszuordnung stattfindet, robuste und Ausreißer unempfindliche Algorithmen einzusetzen sind. Eine Möglichkeit ist die RANSAC-Methode, die zufallsbasierte Such- und Optimierungsprozesse implementiert und sich äußerst robust bei Ausreißern verhält. Ausgehend von einem geeigneten initialen Bildpaar, welches eine kleine Basis und ähnliche Orientierungswerte besitzt, werden alle weiteren Bilder nach und nach hinzu-orientiert. Im Anschluss optimiert eine Bündelausgleichsrechnung die inneren und äußeren Orientierungswerte aller Kamerastandorte. Zusatzinformationen, wie zum Beispiel Passpunkte, fließen direkt in die Ausgleichsrechnungen der Bündeltriangulation mit ein. Hierdurch lassen sich die Genauigkeit verbessern und das Modell global referenzieren. Als Zwischenergebnis resultiert aus einer erfolgreichen Kalibrierung, Orientierung und Referenzierung eine dünn besetzte Punktwolke. Die hochaufgelöste Rekonstruktion erfolgt auf Basis von Stereopaaren mit ihren zu diesem Zeitpunkt bekannten in- und extrinsischen Parameter. Die hieraus entstehenden Teil-Punktwolken werden abschließend in Gesamtmodell miteinander verschmolzen (vgl. Luhmann, 2018).

Zur Abarbeitung aller Prozessschritte ist ein leistungsstarkes Softwarepaket unerlässlich. Die hohe Aktivität auf dem Gebiet der SfM-Technik hat verschiedenste Softwarepakete hervorgebracht. Grundsätzlich liefern sowohl Open Source als auch kommerzielle Softwareprodukte vergleichbare Rekonstruktionsergebnisse (Morales, 2016, Burns und Delporte, 2017). Gravierende Unterschiede bestehen hinsichtlich der Bedienerfreundlichkeit. In aller Regel sind kommerzielle Produkte mit robusten Algorithmen und hochwertigen graphischen Benutzeroberflächen ausgestattet (Djurdjani und Laksono, 2016). Open Source-Ansätze verlangen dem Benutzer

### 3. Photogrammetrie

ein tiefergehendes Prozessverständnis als auch eine höhere technische Versiertheit ab, ermöglichen aber ein Eingreifen auf tiefer Ebene. Im Rahmen dieser Arbeit stand die kommerzielle SfM-Software *Metashape Pro* von *Agisoft* zur Verfügung. Zusätzlich wurden die Open Source Bibliotheken von *OpenCV* herangezogen, um die für die Unterwasserbildverarbeitung notwendigen Prozessierungsschritte zu implementieren.

Das breite Anwendungsspektrum von *Metashape Pro*, das von der Archäologie bis hin zur Unterhaltungsindustrie reicht, zeugt von einem universal einsetzbaren Photogrammetriewerkzeug. Die Entwickler von *Agisoft* versprechen eine hochwertige räumliche Rekonstruktion bei einfacher Verarbeitung. *Metashape Pro* arbeitet nach den gleichen, bereits vorgestellten SfM-Verfahrensprinzipien, die jedoch firmeninterne Eigen- bzw. Weiterentwicklungen nutzen (Semyonov, 2011). Zu Beginn werden aus den Bildern für alle Pixel sogenannte Deskriptoren abgeleitet, die dann zur Erstellung der Korrespondenzen herangezogen werden. Vergleichbar ist dieses Vorgehen mit dem SIFT-Ansatz (Lowe, 1999). Allerdings verspricht *Agisoft* eine höhere Zuordnungsqualität (Semyonov, 2011). Die in- und extrinsischen Kameraparameter schätzt *Metashape Pro* durch einen greedy-Algorithmus ab und verbessert diese Schätzung iterativ durch eine Bündelblockausgleichung. Für die abschließende hochaufgelöste Rekonstruktion greift *Metashape Pro* auf eine paarweise Tiefenkartenberechnung zurück. *Metashape Pro* ist zudem mit einer Python-API ausgestattet, die eine skriptgeführte Programmsteuerung erlaubt. Sie erleichtert die Arbeit bei wiederkehrenden Messaufgaben, indem sie Flüchtigkeits- sowie Eingabefehlern vorbeugt. So erwies sie sich im Versuchsallday als sehr nützlich.

Grundsätzlich genügen den SfM-Verfahren Bilder einer handelsüblichen Digitalkamera, vorausgesetzt, diese sind korrekt fokussiert und mit ausreichend Schärfentiefe ausgestattet, so dass die angezielten Bildnah- und Bildfernpunkte gerade noch scharf erscheinen, und nicht all zu sehr durch Sensorrauschen qualitätsgemindert sind. Letzteres ist durch ausreichend Licht und bei schlechten Lichtverhältnissen durch höherwertige Kamerasensoren sicherzustellen (vgl. Luhmann, 2018).

#### 3.2. Kamerakalibrierung

Die Kamerakalibrierung bestimmt sowohl die intrinsischen Parameter, wie Brennweite, Bildhauptpunktlage und Verzeichnungsparameter als auch die extrinsischen Parameter, wie Kameraposition und Blickrichtung. Der klassische Weg führt über Testfelder, die exakt vermessene Passpunkte bereitstellen und entweder als ebene oder als räumliche Struktur angelegt sind. Der Einfachheit halber wird ebenen Schachbrettmustern in der Praxis der Vorzug gegeben. Um stabile Kalibrierungsparameter zu erlangen, ist darauf zu achten, dass im kompletten Bildbereich

### 3. Photogrammetrie

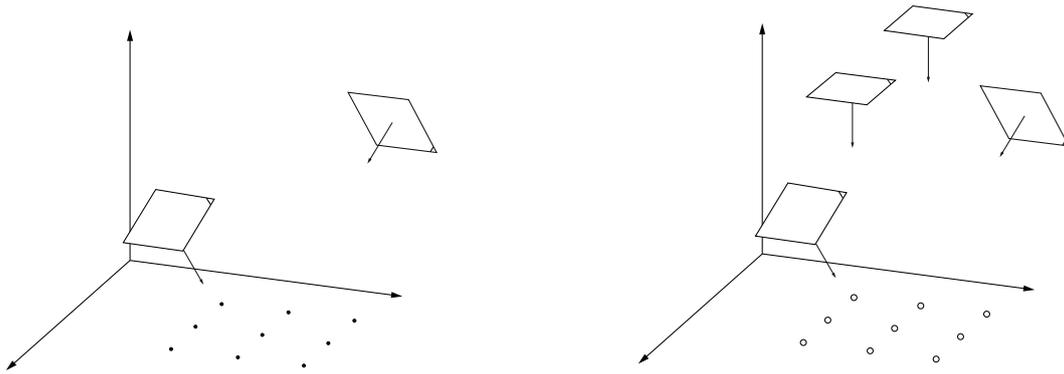


Abbildung 3.2.: Minimal-Aufnahmekonfigurationen zur Bestimmung der Brennweite und Bildhauptpunktlage ohne weitere Objektivverzeichnungen nach Wester-Ebbinghaus (1985). links: ebenes Passpunktefeld mit bekannten Objektraumkoordinaten; rechts: ebenes Passpunktefeld ohne bekannten Objektraumkoordinaten

Passpunkte vorliegen. Dies kann durch ein ausreichend großes Kalibrierfeld oder die Verschiebung des Kalibrierfeldes im Bildbereich erreicht werden.

Für die Kalibrierung selbst werden die Bildraumkoordinaten der Passpunkte mit den zugehörigen, bekannten Objektraumkoordinaten über die Kollinearitätsgleichungen verknüpft. Die Verknüpfung von Bild- und Objektraumkoordinaten der Passpunkte bildet ein überbestimmtes Gleichungssystem, aus dem durch iterative Ausgleichsverfahren die in- und extrinsischen Parameter errechnet werden können. Moderne photogrammetrische Verfahren verzichten auf Testfeldaufnahmen und setzen an Stelle dessen Simultankalibrierungsmethoden ein, die die Parameter im Rahmen der Bündelausgleichsrechnung mitbestimmen (vgl. Luhmann, 2018).

Unabhängig vom angewandten Kalibrierungsverfahren ist auf die Aufnahmeanordnung zu achten. Schwache Aufnahmeanordnungen ziehen unerwünschte Korrelation und fehlerhafte Parameter nach sich (Luhmann, 2018). Um den hohen Genauigkeitsansprüchen, die an die Kalibrierung der Nahbereichsphotogrammetrie gerichtet sind, gerecht zu werden, sollte die Aufnahmeanordnung den Empfehlungen von Wester-Ebbinghaus (1983, 1985) folgen. Für Mehrkamerasysteme empfiehlt sich zudem eine vorgeschaltete Kamerakalibrierung (Luhmann, 2018).

### 3.3. Mehrmedieneinsatz

Photogrammetrische Rekonstruktionsverfahren sind an sich nicht per se für den Mehrmedieneinsatz geeignet. In der Regel sind die Rekonstruktionsverfahren für den Einmedieneinsatz konzipiert. Sie basieren auf der zentralperspektivischen Abbildungsvorschrift, die von einem geradlinigen Strahlverlauf ausgeht. Im Mehrmedieneinsatz kommt es an den Trennflächen unterschiedlich optisch dichter Medien zu einer Strahlablenkung bzw. Brechung, wodurch die Annahme des

### 3. Photogrammetrie

geradlinigen Strahlverlaufs verletzt wird. Das Ausmaß des Fehlers hängt von der Aufnahmesituation sowie der Trennflächengeometrie ab, für Details siehe Kapitel 4. Je nach technischer Realisierbarkeit und Qualitätsanspruch sind über die Jahre unterschiedliche Vorgehensweisen entstanden, die sich in Qualität, Komplexität und Nutzbarkeit stark unterscheiden.

Schon früh wurde damit begonnen, die Einmedien-Verfahren Mehrmedien-tauglich zu machen. Hierzu wurden eigene Korrekturverfahren, Kamerakalibrierungsmethoden, Hilfsmodelle und Mehrmedienkonzepte entwickelt. Im Nachfolgenden sind einige unterwasserphotogrammetrische Arbeiten angeführt, die nach Aufnahmetechnik gruppiert sowie chronologisch und thematisch geordnet sind.

#### 3.3.1. Sequentielle Bildfolge – Einkamerasysteme

In den Anfängen der Unterwasserphotogrammetrie wurden die sequentielle Bildfolgen von Einkamerasystemen noch paarweise über einen Stereoplotter ausgewertet. Diese Auswertemaschinen verarbeiten über eine spezielle Optik das Bildpaar so, dass daraus die Tiefeninformationen ableitbar sind. Für Unterwasseranwendungen wurden diese Auswertemaschinen mit speziellen Brechungskorrekturen versehen. Mit der Digitalisierung und Fortentwicklung der Auswertetechnik erhielt das SfM-Rekonstruktionsverfahren Einzug in die Auswertung sequentieller Bildfolgen, wie sie beispielsweise auch von Drohnen aufgenommen werden. Mit diesem Verfahren gelingen Geländerekonstruktionen größerer Bildverbände, die je nach Ansatz bereits brechungskorrigiert sind.

Bei der Auswertung sequentieller Bildfolgen über Stereoplotter werden zwei sich überlappende Bilder durch eine spezielle Optik hindurch betrachtet. Um die für die Landvermessung konzipierten Geräte für Unterwasseranwendung nutzbar zu machen, wurden sie mit speziellen Brechungskorrektur-Algorithmen ausgestattet. Ein Beispiel für deren Anwendung ist die luftgestützte Photogrammetrie von Küstengewässern. Tewinkel (1963) erarbeitete hierfür einen Korrekturfaktor, der die Brechungseffekte der stereometrischen Tiefenmessung im Mehrmedienfall korrigiert. Der Korrekturfaktor hängt vom Brechungsindex, Beobachtungswinkel und der Wassertiefe ab. Darüber hinaus untersuchte Tewinkel (1963) die Einflüsse der Flughöhe, des Basisabstandes und der Oberflächenwellen. Letztere dominieren die Messgenauigkeit, die mit einer mittleren Abweichung von 8 % der gemessenen Fließtiefe angegeben ist (vgl. Tewinkel, 1963).

Ein ähnliches Anwendungsbeispiel ist die von Fryer (1983) durchgeführte Unterwasservermessung von Korallen. Zur Erfassung wurde eigens ein aus Kunststoffrohren zusammengesetztes schwimmendes Kameragestell gefertigt. Von diesem blickte die Kamera aus einer Höhe von ca. 5 m senkrecht auf die Wasseroberfläche. Direkt unterhalb der Kamera wurde eine

### 3. Photogrammetrie

2,0 × 1,0 × 0,1 m große Plexiglaswanne platziert, deren Aufgabe es war, die störenden Oberflächenwellen zu beseitigen. Die Auswertung erfolgte am Stereoplotter, der infolge des geringen Aufnahmeabstandes mit einem iterativen Korrektionsverfahren ausgestattet werden musste (Fryer, 1983). Beim Studium des Einflusses von Oberflächenwellen auf das Rekonstruktionsergebnis zeigten Fryer und Kniest (1985), dass mit größer werdendem Verhältnis von Aufnahmeabstand zu Brennweite, dieser abnimmt. Eine weitere Erkenntnis aus den Untersuchungen ist, dass schleifende Schnitte unterhalb der Kamera, die aufgrund der sehr flachen Verschneidungswinkel entstehen, besonders sensitiv auf eine Veränderung der Wasseroberfläche reagieren (vgl. Fryer, 1983, Fryer und Kniest, 1985).

Murase et al. (2008) verbesserten im Zuge von Arbeiten zur luftgestützten Kartierung eines Riffs die Auswertemethodik von Fryer und Kniest (1985). Sie unterteilen die sich überlappenden Bildbereiche in drei Kategorien: entlang des Flugweges, auf der Halbierungsgeraden, die senkrecht zum Flugweg steht und zwischen zwei Aufnahmen liegt, und der verbleibende Rest. Die analytischen Lösungen der beiden ersten Kategorien vereinfachen die Korrekturen im verbleibenden Überlappungsbereich (vgl. Murase et al., 2008).

Malavasi et al. (2004) filmten kurze Sequenzen der sohlmorphologischen Veränderungen, die an einer Verengung eines Strömungskanals auftraten. Jede Sequenz dauerte zwei Sekunden. Die Bildrate betrug 50 Bilder pro Sekunde. Es wurde von oben durch eine aufgelegte Plexiglas-scheibe hindurch aufgenommen. Die Autoren haben ein Differenzbild-Verfahren entwickelt, das nicht auf eine Markierung einzelner nachzuverfolgender Sedimentpartikel angewiesen ist, sondern mit natürlichem Sohlmaterial funktioniert. Mit den in den Bildern identifizierten, sich bewegenden Partikeln konnten die Bewegungspfade einzelner Sedimentkörner nachverfolgt und eine lokale Bewegungsintensität kleinerer Auswertebereiche erhoben werden. Die lokale Bewegungsintensität setzt die Anzahl an bewegten Partikeln in Relation zur Gesamtanzahl der sich im Auswertebereich befindlichen Partikel, die durch Zählung ermittelt wurden. Die Bildverarbeitungsprozesse sind so konzipiert, dass die bewegten Partikel zuverlässig erkannt werden, nicht aber deren korrekte Größe. Ein spezieller Unterwasseransatz, der die Brechungserscheinungen korrigiert, ist nicht thematisiert (vgl. Malavasi et al., 2004). Radice et al. (2006) setzten die Untersuchungen zum Bewegungsbeginn fort. Zusätzlich zum weiterentwickelten Differenzbild-Verfahren werteten Sie die Bildsequenzen auch mit Particle Image Velocimetry-Verfahren aus, woraus die Partikelgeschwindigkeiten hervorgingen. Pflieger (2010) erweiterte das Verfahren von Malavasi et al. (2004), Radice et al. (2006, 2008), indem die räumlich variable Verzerrung herausgerechnet wird. Das Auswertevorgehen benötigt eine bereits vermessene Sohloberfläche und eine imaginäre Kameraposition, die aus den Unterwasser-Strahlgängen der Randstrahlen gewonnen wird. So lässt sich über Strahlensätze die Partikelposition an der Sohloberfläche errechnen (Pflieger, 2010). Der Schwachpunkt dieses Vorgehens liegt in der festgeschriebenen

### 3. Photogrammetrie

imaginären Kamerahöhe, die strenggenommen nur für die Randstrahlen Gültigkeit besitzt. Für andere Bildstrahlen ergeben sich andere imaginäre Kamerahöhen.

Westaway et al. (2001) konzipierten ein Verfahren zur Gewinnung digitaler Flussmodelle. Dieses wurde mit einer Brechungskorrektur ausgestattet, die auf dem in Nachfolgenden beschriebenen Korrekturansatz von Butler et al. (2002) beruht. Aus der Wasserspiegellinienlage an den Ufern wurde die Wasseroberfläche grob rekonstruiert, um als Trennfläche ins Verfahren gegeben werden zu können. Ungenaue Interpolationsverfahren zur Rekonstruktion der Wasseroberfläche erwiesen sich als vorteilhaft, da sie ein glatteres Ergebnis lieferten. Mit Kenntnis der Wasseroberfläche konnten die vom Wasser überdeckten Bereiche die Höhenkorrektur durchlaufen (vgl. Westaway et al., 2001). Auch Feurer et al. (2008) erstellten ein digitales Flussmodell auf Basis von Luftbildaufnahmen. Sie korrigierten ebenfalls auf Grundlage der Wasserspiegellinienlage an den Ufern die vom Wasser überdeckten Bereiche. Der mittlere Fehler lag bei 0,1 m (vgl. Feurer et al., 2008).

van Damme (2015) kartierte eine unterwasserarchäologische Fundstelle mit Hilfe einer Action-Cam, die die Bilder für eine SfM-Rekonstruktion lieferte. Im Zuge der Rekonstruktion wurde ein konventionelles Verzeichnungsmodell verwendet. Die Fischaugenlinse der Action-Cam scheint die Brechungseffekte teilweise zu kompensieren. Der kurze Aufnahmeabstand, als Folge der schlechten Sichtverhältnisse, bedingte eine Gesamtanzahl von mehr als 7000 Bildern, die aufgeteilt in elf Blöcke zuerst zu Teilmodellen vorverarbeitet und danach zu einem Gesamtmodell zusammengesetzt wurden. Nachdem die Software in der Lage war, alle Teilmodell erfolgreich zusammensetzen, schlussfolgerte van Damme (2015), dass die Modellqualität gut sein muss. Einen quantitativen Beleg für diese Aussage erbrachte er jedoch nicht (vgl. van Damme, 2015).

Jordt et al. (2016) machte ein klassisches SfM-Verfahren unterwassertauglich. Für die einzelnen Kamerastandorte wurden lokal mehrere perspektivische Abbildungsmodelle, die entlang der Brennfläche gelegen sind, angewandt. Zusammen mit speziellen Kalibrierungsverfahren, Algorithmen zur Positionsbestimmung, einer effizienten, nicht-linearen Fehlerfunktion zur Bündeltriangulation und einem brechungskorrigierten *Plane-Sweep*-Algorithmus gelangen qualitativ hochwertige Unterwasserrekonstruktionen (vgl. Jordt et al., 2016).

#### 3.3.2. Synchronisierte Stereoaufnahmen

Fest installierte Stereosysteme schaffen klar definierte Überlappungsbereiche und können mit entsprechender Synchronisation selbst dynamische Szenen erfassen.

Butler et al. (2002) erstellten auf Grundlage analoger Stereoaufnahmen hochaufgelöste digitale Geländemodelle von Kiessohlen. Bei den Labor- und Feldmessungen wurden die poten-

### 3. Photogrammetrie

tiellen Störeinflüsse der Oberflächenwellen durch Auflegen einer Plexiglaswanne eliminiert. Die Unterwasserrekonstruktion erfolgte zunächst auf Basis eines konventionellen Einmedien-Verfahrens, welche auf luft- und unterwasserseitige Passpunkte zurückgreifen konnte. Zur Kompensation der Brechungseffekte wurde das aus der Punktwolke abgeleitete digitale Geländemodell, kurz DGM, einer Höhenkorrektur unterzogen. Mit dieser gelang es den mittleren Fehler von 0,0256 m auf 0,0035 m zu reduzieren. Bei der Auswertung ihrer Versuche verglichen Butler et al. (2002) unterschiedliche Auswertevorgehen. Aus der Ergebniszusammenstellung wird ersichtlich, dass die Kombination aus photogrammetrischer Rekonstruktion mit Unterwasser-Passpunkten und anschließender DGM-Höhenkorrektur zu einer Verschlechterung führt. Der mittlere Fehler wächst infolge der DGM-Höhenkorrektur von 0,002 m auf 0,0392 m an (vgl. Butler et al., 2002). Aus den Ausführungen von Butler et al. (2002) erschließt sich nicht, warum bei den Kalibrierungen mit Unterwasser-Passpunkten, die einer impliziten Brechungskorrektur gleichkommen, zusätzlich eine Höhenkorrektur erfolgte.

Harvey et al. (2003) vermaßen unter Wasser stereometrisch die Länge von Blauflossen Thunfischen. Die aus zwei Videokameras bestehende stereometrische Vorrichtung wurde vorab in einem Schwimmbecken unter Wasser kalibriert, wodurch die Brechungskorrektur implizit in den konventionellen Einmedien-Ansatz eingearbeitet wurde. Vergleichsmessung mit Messschiebern zeigten einen mittleren Fehler von 1,72 mm (vgl. Harvey et al., 2003).

Eder et al. (2011) zeichneten die Sohlentwicklung eines Pfeilerkolks in seiner Entstehungsphase mit einem synchronisierten stereometrischen Kamerasystem auf. Sie bestückten sowohl die ebene Trennfläche als auch die Sohle mit Passpunkten. Als vereinfachte Brechungskorrektur wurden die photogrammetrisch rekonstruierten Sohlpasspunkte über eine geometrische Transformation, bestehend aus Verschiebung, Rotation und Skalierung, in die trocken eingemessenen Passpunktkoordinaten überführt. Diese vereinfachte Korrektur gilt nur für die Entfernung der Sohlpasspunktebene (vgl. Eder et al., 2011). Mit zusätzlichen Korrekturmatrizen für außerhalb der Sohlpasspunktebene liegenden Punkten verbesserten Rapp et al. (2012) das Ergebnis der Sohlrekonstruktion. Die Korrekturmatrizen entstanden aus Aufnahmen eines über die Tiefe verschobenen Kalibrierfeldes. Sie dienen der Lage- und Höhenkorrektur der einzelnen Punkte. Aus den Aufzeichnungen der Sohlveränderungen konnten neben einer Visualisierung das zeitliche Verhalten der Erosionsraten, Gefällestrukturen, Volumina sowie maximale Eintiefungs- bzw. Auflandungshöhen herausgearbeitet werden (vgl. Rapp et al., 2012).

Bertin et al. (2013) fertigten mit einer stereometrischen Aufnahmeeinheit hochaufgelöste digitale Höhenmodelle von abgepflasterten Sohlzuständen an. Sie verzichteten auf fest installierte Passpunkte, die in aller Regel den Versuch stören, und kalibrierten anstelle dessen ein Einmedien-Verfahren in-situ. Mit dem Anspruch, das System nach erfolgter Kalibrierung nicht mehr bewegen zu müssen, war es notwendig die Kalibrierung im laufenden Versuch an Ort und

### 3. Photogrammetrie

Stelle vorzunehmen. Zum Schutze der empfindlichen Sohle wurde diese vor dem Kalibriervorgang mit einer Platte abgedeckt. Die räumlich verteilten Aufnahmen eines kleinen Kalibrierfeldes entstanden in dem über der Schutzplatte verbleibenden Wasserkörper. Zur Beruhigung der Oberfläche wurde lediglich die Fließgeschwindigkeit gedrosselt, so dass störende Oberflächenwellen verschwanden. Auf den Einsatz einer zusätzlichen Trennfläche wurde verzichtet. Zur Beurteilung der Qualität entstanden zudem Aufnahmen im trockenen Zustand, die mit den Unterwasseraufnahmen verglichen wurden. Der Vergleich erfolgte anhand einer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Gewässerbethöhen, die aus dem digitalen Höhenmodell abgeleitet wurde (vgl. Bertin et al., 2013).

Detert et al. (2018) entwickelten ein Verfahren zur Nachverfolgung von Fischeschwimmpfaden. Die Fische durchschwammen einen elf Meter langen Strömungskanal, der am Ende mit einem Horizontalrechen ausgestattet war. Ihr Schwimmverhalten wurde von elf synchron aufzeichnenden Kameras, die seitlich entlang des Gerinnes montiert waren, festgehalten. Die Bildausschnitte benachbarter Kameras überschneiden sich so, dass stets ein Stereopaar gebildet werden konnte. Das System verwendet konventionelle Einmedienmodelle, die unter Wasser kalibriert wurden. Die Schwimmpfade der Fische wurden zunächst direkt aus dem Bildrohmaterial gewonnen und erst im Nachgang mit den Kalibrierungsparametern in räumliche Bewegungspfade umgerechnet (vgl. Detert et al., 2018).

#### 3.3.3. Mehrkamarasysteme

Im Wasserbau finden synchronisierte Mehrkamarasysteme bislang überwiegend bei volumetrischen PIV- und PTV-Verfahren Einsatz, wo sie räumliche Geschwindigkeitsfelder erfassen. Die räumliche Vermessung der Sohldynamik führt eher ein Nischendasein, obwohl moderne Hard- und Software die technische Realisierung erleichtern und die Anschaffungspreise der Hardwarkomponenten extrem gefallen sind.

Maas (1992b) entwickelte ein photogrammetrisches System zur Erfassung räumlicher Geschwindigkeitsfelder. Die synchron aufgenommenen Bilder zeigen Strömungspartikel, die einige Pixel groß sind. PTV-Auswerteverfahren identifizieren die einzelnen Partikel und verfolgen diese nach. Zur Brechungskorrektur wurde ein Mehrmedienmodul entwickelt, das für jeden Objektraumpunkt einen radialen Korrekturwert bereithält. Die radialen Korrekturwerte verschieben die Objektraumpunkte auf die Verlängerung des luftseitigen Strahlwegs. Betrag und Richtung der radialen Verschiebung hängen von der Kameraposition sowie der Lage und Dicke der Trennfläche ab. Das bedeutet, dass ein und derselbe Objektraumpunkt je nach Aufnahmekonfiguration mit unterschiedlichen radialen Verzeichnungen zu versehen ist. Bildlich gesprochen verzerrt dieses Vorgehen die Aufnahmen so, dass sämtliche Trennflächeneffekte verschwinden, was den

### 3. Photogrammetrie

Einsatz von Einmedienmodellen rechtfertigt. Zur Realisierung wurden die Kollinearitätsgleichungen der Einmedienmodelle um die radiale Objektraumverzeichnung erweitert (vgl. Maas, 1992b).

Wolff (2007) entwarf ein Approximationsmodell, das lokal mit konventionell perspektivischen Abbildungsmodellen arbeitet. Der Beobachtungsraum wird im Verfahren auf Basis von Qualitätsuntersuchungen aufgeteilt. Jeder Bereich wird mit einer virtuellen Kamera versehen. Die Lage der virtuellen Kamera ist durch die Brennfläche definiert, die lokal durch einen Punkt angenähert werden muss. Zur Kalibrierung benötigt das Verfahren luft- und wasserseitige Passpunkte. Aus den Aufnahmen eines Vier-Kamera-Systems ergaben sich bei der Passpunkt-Rekonstruktion mittlere Standardabweichungen in der Höhe von 1,49 mm und in der Lage von 0,43 mm (vgl. Wolff, 2007).

An der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) wurde in Zusammenarbeit mit der Firma *AICON* ein berührungsloses Sohlmesssystem zur Anwendungsreife gebracht (Godding et al., 2003). Das System projiziert ein regelmäßiges Gitter direkt durch die Wasseroberfläche hindurch auf die Sohle, welches von bis zu drei Kameras aufgezeichnet wird. Oberflächenwellen stören die Vermessung erst ab einer Froudezahl größer als 0,3, ab der die Annahme einer ebenen Trennfläche zu sehr verletzt ist (Henning et al., 2008). Zur Korrektur der Brechungseffekte setzt das photogrammetrische Verfahren die Kenntnis der Wasserspiegellage voraus. Die 3D-PTV-Erweiterung des System von Henning et al. (2007) vermisst die Oberflächengeschwindigkeiten von Partikeln. Zudem liefert das Verfahren die räumlichen Positionen der Partikel, aus denen sich die Wasserspiegellage im laufenden Versuch bestimmen lässt. Im Versuchsbetrieb erreicht die PTV-Erweiterung Genauigkeiten von 0,6 mm in der Höhe und 0,3 mm in der Lage (Henning et al., 2007). Bei der Sohlvermessung durch die Wasseroberfläche hindurch ist mit Höhenfehlern von 2,5 mm zu rechnen. Trockene Vergleichsmessungen ergeben lediglich einen Höhenfehler von 0,25 mm. An der BAW wurden mit dem *AICON*-System verschiedenste Untersuchungen gemacht, unter anderem ist die Dynamik von Dünenfelder vermessen worden (Henning et al., 2009). Auch die VAW der ETH Zürich ist in Besitz eines *AICON*-Systems, mit welchem zum Beispiel das räumliche Deichbruchverhalten (Frank, 2016) oder die räumliche Ausbreitung von rutschungsinduzierten Impulswellen (Evers, 2017) untersucht wurden. Für unproblematische Fließgebiete kann die Sohle mit einer Höhengenaugkeit von 2 mm erfasst werden, wohingegen in Bereichen mit starken Oberflächengradienten Abweichungen von bis zu 10 mm möglich sind (Frank, 2016).

#### 3.3.4. Korrekturmodelle - Strenge Lösung vs. Näherungslösungen

Die strenge Lösung im Mehrmedienfall muss alle Einflüsse, die die Ablenkung des Strahlwegs bewirken, berücksichtigen (Höhle, 1971). In der Regel werden der Einfachheit halber die

### 3. Photogrammetrie

Trennflächengeometrie als perfekt und die Medien als isotrop angesehen (Maas, 1992b). Die Strahlwegskonstruktion, ausgehend vom Projektionszentrum mit bekannter Strahlrichtung, ist problemlos möglich. Die Gegenrichtung, vom Objektraum in den Bildraum, erfordert ein iteratives Vorgehen (Höhle, 1971).

Ansätze, die der strengen Lösung folgen, bilden die Ausnahme. Beispielsweise das von Kotowski (1987) veröffentlichte allgemeine Mehrmedienmodell, das beliebige Trennflächen im Strahlenbündel beherrscht. Auch das von Maas (1992a) entworfene Mehrmedienmodul folgt der strengen Lösung, indem durch objektraumseitige Verzeichnungen die Punkte so verschoben werden, dass die Einmedienmodelle ihre Gültigkeit erhalten, siehe Abbildung 3.3. Strenge Lösungen sind auch dann möglich, wenn anstelle perspektivischer Abbildungsmodelle allgemeinere Kameramodelle treten, beispielsweise strahlenbasierte (Grossberg und Nayar, 2005).

Für Näherungslösungen des Dreimedienfalls, Luft-Glas-Wasser, können entweder die Trennfläche durch Luft oder die gesamte Luft-Glas-Phase durch Wasser ersetzt werden, siehe Abbildung 3.3. Die letztgenannte Näherung reduziert ein System auf den Einmedienfall und erzwingt die Brechungseffekte in die Verzeichnungsparameter des Objektivs einzuarbeiten. Allerdings sind diese an den Aufnahmeabstand gebunden und nicht allgemein gültig (Höhle, 1971). Ob die Qualität der Näherungen durch ein Einmedien-Modell genügt, hängt von der Aufnahmekonfiguration und Objektraumbeschaffenheit ab. Unter günstigen Umständen können die Fehler akzeptabel sein. Weniger günstige Umstände lassen die Fehler extrem anwachsen. Zudem reagieren die Systeme sensitiv auf jegliche Veränderungen.

### 3. Photogrammetrie

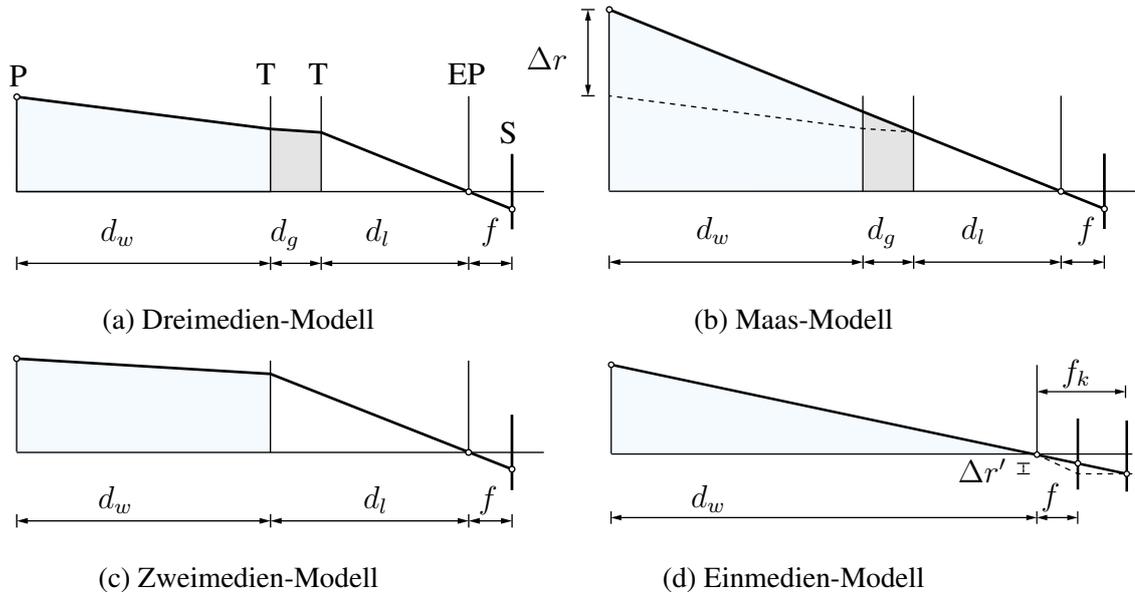


Abbildung 3.3.: Strahlgänge im Mehrmedienfall angelehnt an Höhle (1971) und ergänzt durch Maas (1992b). Zur Erläuterung: die fetten durchgezogenen Linien markieren den Strahlverlauf im jeweiligen Modell, die gestrichelten Linien zeigen den tatsächlichen optischen Strahlverlauf,  $f$  bezeichnet die Brennweite und  $d_w$ ,  $d_g$  sowie  $d_l$  die senkrechten Abstände zum Sensor. P steht für die Objektebene, T für Trennfläche, EP für Eintrittspupille und S für Sensorfläche. Im Dreimedien-Modell bricht sich der Strahl an den zwei Trennflächenübergängen, siehe 3.3a. Das Maas-Modell verschiebt objektraumseitig den Punkt um  $\Delta r$ , so dass der geradlinige Strahlverlauf des Einmedienfall im Mehrmedien-Fall angewendet werden darf, siehe 3.3b. Im Zweimedien-Modell existiert nur ein Trennflächenübergang, der entweder zur Vereinfachung des Dreimedien-Falls dient oder der Aufnahmesituation entspringt, die auf eine zusätzliche Trennfläche verzichtet und direkt durch die Wasseroberfläche hindurch aufnimmt, siehe 3.3c. Im Einmedienmodell durchläuft der Strahl ausschließlich das Medium Wasser, die hervorgerufenen Brechungen werden auf dem Sensor durch Zusatzverzeichnungen  $\Delta r'$  wahrgenommen. Um dem geradlinigen Strahlverlauf zu entsprechen wird eine korrigierte Brennweite  $f_k$  herangezogen, 3.3d.

#### 3.4. Zusammenfassung

Photogrammetrische Verfahren rekonstruieren aus Bildern, die klar erkennbare und ausreichend texturierte Objekte enthalten, deren Form und Größe. Die zur Aufnahme eingesetzte Optik und deren Aufnahmeabstand zum Objekt entscheiden darüber, welche Details in den Bildern aufgelöst werden können. Demnach müssen die einzelnen Gesteinskörner und deren Umrandungen in den Aufnahmen klar erkennbar sein, um daraus die Sohltopographie auf Einzelkornebene rekonstruieren zu können. Mit dem für die Unterwasseraufnahmen eingesetzten Mehrkamerasystem wurden Abschattungen vermieden, die zu Löchern in der rekonstruierten Punktwolke geführt hätten.

Der Unterwassereinsatz erschwert die Bildaufnahme und verkompliziert den photogrammetrischen Auswerteprozess. Die in dieser Arbeit fein aufgemessenen Strukturen wären durch Oberflächenwellen zu sehr gestört worden, deshalb wurden die Kameras in ein Unterwassergehäuse eingebaut. Die Trennflächenübergänge rufen Verzerrungen hervor, die stark vom Aufnahmeabstand abhängen. Für eine hochgenaue Rekonstruktion sind Korrekturen, die die abstandsabhängigen Brechungseffekte berücksichtigen, zwingend vorzunehmen. Das im weiteren Fortgang entwickelte Unterwasser-Rekonstruktionsverfahren greift die Idee von Maas (1992b) auf, der eine Verschiebung der Objektraum-Punkte nutzt. Anders als bei Maas (1992b), der dies in die Kollinearitätsgleichungen integrierte, werden in dieser Arbeit die Eingangsdaten so aufbereitet, dass Einmedien-Modelle fehlerfrei darauf angewendet werden können. Das hier vorgestellte Verfahren folgt somit den strengen Lösungen im Mehrmedienfall und trägt daher keine modelltheoretischen Fehler.

## 4. Optik

Das folgende Kapitel erläutert die optischen Eigenschaften und Zusammenhänge, die das Aufnahmesystem und die Auswertungen betreffen, Schritt für Schritt. Zum Einstieg wird die Frage, ob Wasser näherungsweise als homogenes Medium angesehen werden kann, diskutiert. Im Anschluss daran folgt die Vorstellung der im Mehrmedienfall einsetzbaren Trennflächengeometrien mit ihren Eigenschaften. Für die beiden gängigsten Trennflächengeometrien werden anschließend die mathematischen Beschreibungen der Strahlengänge im Mehrmedienfall entwickelt. Diese Formulierungen bilden die Grundlage der weiteren Betrachtungen von Brennflächen und Verzeichnungen. Während Brennflächen einen eher informativen Charakter besitzen, indem sie die Abweichungen vom perspektivischen Modell herausarbeiten, sind Verzeichnungen von konkreter Relevanz, da diese sich direkt in den Aufnahmen niederschlagen. Das Kapitel schließt mit Betrachtungen zu Fokus, Blende und Schärfentiefe, die sich in erster Linie in der Bildqualität niederschlagen.

### 4.1. Brechungsindex

Der Brechungsindex von Wasser ist strenggenommen eine Funktion der Wellenlänge, des Salzgehalts, der Temperatur und des Drucks (Mobley, 1994). In ozeanischen Anwendungen variiert der Brechungsindex von Wasser um weniger als drei Prozent (Mobley, 1994). Die an der Versuchsanstalt Oberrach vorzufindenden Versuchsbedingungen sind durch einen gleichbleibenden Salzgehalt und sehr geringen Änderungen bei Temperatur und Druck ausgezeichnet. Folglich ist die Variation des Brechungsindex primär auf die Wellenlänge zurückzuführen. Zur Beleuchtung eingesetzte LED-Linearmodule emittieren Licht in einem Spektrum von 450 nm bis 650 nm, so dass der Brechungsindex zwischen 1,348 und 1,339 schwankt. Die Streubreite liegt deutlich unter einem Prozent. Durch die Verwendung von monochromatischen Lichtquellen, wie etwa Laserdioden, die Licht mit einer bestimmten Wellenlänge emittieren, ließe sich die Schwankungsbreite weiter reduzieren. Vom Einsatz eines Lasers zur Beleuchtung wurde abgesehen, da dies mit enormen Vorkehrungen zum Arbeitsschutz bzw. Arbeitssicherheit verbunden gewesen wäre. Photogrammetrische Anwendungen setzen in der Regel voraus, dass die durchdrungenen Medien homogen und isotrop sind, sprich mit einem konstanten Brechungsindex modelliert werden können (Sedlazeck und Koch, 2012, Luhmann, 2018). Im Zuge der Parameterkalibrierung kann der exakte Brechungsindex gleich mitbestimmt werden (Treibitz et al.,

## 4. Optik

2012). Auch eine Modellierung inhomogener Verteilungen durch diskretisierte Brechungsindexfelder ist vorstellbar. Das birgt in der Umsetzung einige Schwierigkeiten, deshalb wird in der Praxis üblicherweise von einem konstanten Brechungsindex ausgegangen (Maas, 1992b).

### 4.2. Unterwassergehäuse - Trennflächengeometrie

Die Pioniere der Unterwasserphotographie William Thompson, mit ersten veröffentlichten Unterwasserphotographien aus dem Jahr 1856 (Adam, 1993), und Louis Boutan, mit ersten veröffentlichten Aufnahmen aus dem Jahr 1893, haben ihre Kamerasysteme in wasserdichten Unterwassergehäusen verpackt, da Versuche ohne Gehäuse scheiterten (Rebikoff, 1975). Dazu ließen sie sich wasserdichte Kästen mit einer ebenen Glasscheibe als Trennfläche anfertigen, die sie auf die Wasseroberfläche auflegen oder untertauchen konnten. Bei diesem Aufbau durchlaufen die Strahlen drei Medien, die Luft der Aufnahmekammer, das Glas, das als Trennfläche fungiert, und die Wasserphase. An den Übergängen Luft-Glas und Glas-Wasser werden die Strahlen gebrochen.

Selbst moderne unterwasserphotogrammetrische Anwendungen greifen überwiegend auf ebene Trennflächen zurück, siehe Abbildung 4.1a, (Sedlazeck und Koch, 2012). Die Gründe liegen in der vergleichsweise einfachen Fertigung, die sich im Anschaffungspreis widerspiegelt, und ebenso einfachen Handhabung der ebenen Vorsatzlinse (Menna et al., 2017). Die Aufnahmen durch ebene Trennflächen hindurch weisen jedoch starke chromatische Aberrationen auf, die einen Schärfefall zu den Rändern hin bedingen. Zudem wird das Sichtfeld um den Faktor des Brechungsindex von Wasser reduziert. Die ebenen Trennflächen nehmen jedoch keinen Einfluss auf den Fokus, wodurch die Objektivscharfstellung unter Wasser erhalten bleibt (Treibitz et al., 2012).

Eine Alternative zu ebenen Trennflächen sind hemisphärische Trennflächen, die bei korrekter Ausrichtung keine Brechungseffekte hervorrufen, siehe Abbildung 4.1b. Sie zeigen keine chromatische Aberration und garantieren eine gleichbleibende Schärfe im Bildbereich (Shortis, 2015). Das Sichtfeld bleibt erhalten (Menna et al., 2017). Allerdings ist der Fokus des Objektivs auf das virtuell entstehende Bild auszurichten. Die ausführlichen Erläuterungen hierzu finden sich in Abschnitt 4.7. Theoretisch ermöglichen hemisphärische Trennflächen eine fehlerfreie Anwendung konventioneller Einmedien-Photogrammetriemodelle im Mehrmedienfall (Kunz und Singh, 2008, Luhmann, 2018). Obgleich hemisphärische Trennflächen vom Standpunkt der Optik aus gesehen ebenen Systemen vorzuziehen wären, wird die korrekte Ausrichtung als großes Hindernis und als zu aufwendig und fehlerbehaftet eingestuft (Sedlazeck und Koch, 2012). Im Rahmen dieser Arbeit wird noch dargelegt werden, dass eine gute Ausrichtung durchaus zu erreichen ist.

## 4. Optik

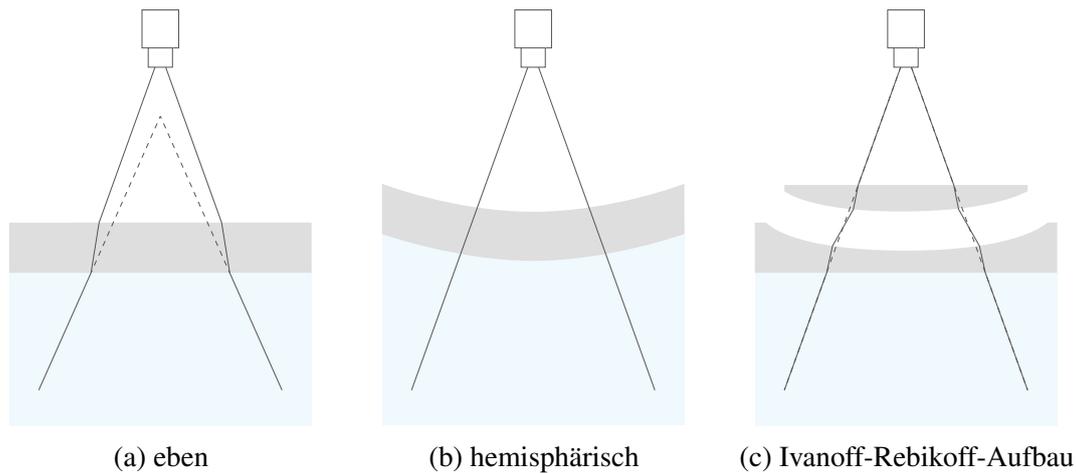


Abbildung 4.1.: Mögliche Trennflächegeometrien für Unterwassergehäuse. Die durchgezogenen Linien markieren den tatsächlichen Strahlverlauf und die gestrichelten Linien den Strahlverlauf des Einmedienmodells. Alle Kameras sind luftseitig angeordnet. Die grau schraffierten Flächen stellen die Linsen dar und die blau schraffierten Flächen die Wasserphase. Die luftseitig loslaufenden Strahlen durchdringen die Glasscheibe, dabei werden sie zweimal gebrochen, und koppeln danach in die Wasserphase ein.

Die *Ivanoff-Rebikoff*-Vorsatzlinse, siehe Abbildung 4.1c, vereint die Vorteile von ebenen und hemisphärischen Vorsatzlinsen (Rebikoff, 1968). Sowohl das Sichtfeld als auch der Fokus bleiben unverändert. Allerdings stellt *Ivanoff-Rebikoff*-Vorsatzlinse höchste Ansprüche an die Fertigung, da beide Linsen nicht nur präzise geschliffen, sondern auch exakt zueinander ausgerichtet sein müssen. Die im Rahmen dieser Arbeit gegebenen finanziellen und fertigungstechnischen Möglichkeiten sprachen gegen einen Einsatz von *Ivanoff-Rebikoff*-Vorsatzlinsen, weshalb diese in den weiteren Überlegungen und Ausführungen keine Beachtung mehr finden.

### 4.3. Strahlengang im Mehrmedienfall

Die im Folgenden vorgestellten mathematischen Beschreibungen der Strahlengänge im Mehrmedienfall dienen der Bestimmung von Kaustiken 4.4 und Verzeichnungen 4.5. Im Anwendungsfall der Unterwasserphotogrammetrie durchlaufen die Strahlen typischerweise drei Medien: Luft, Glas und Wasser. Durchdringen Strahlen unterschiedliche Medien, die ihrerseits als homogen und isotrop anzusehen sind, brechen sie sich beim Medienübergang (Luhmann, 2018), wobei die Trennflächenlage und -form über den weiteren Fortgang der Strahlen entscheiden. Die Kenntnis des genauen Strahlengangs hilft bei der Beurteilung eines optischen System.

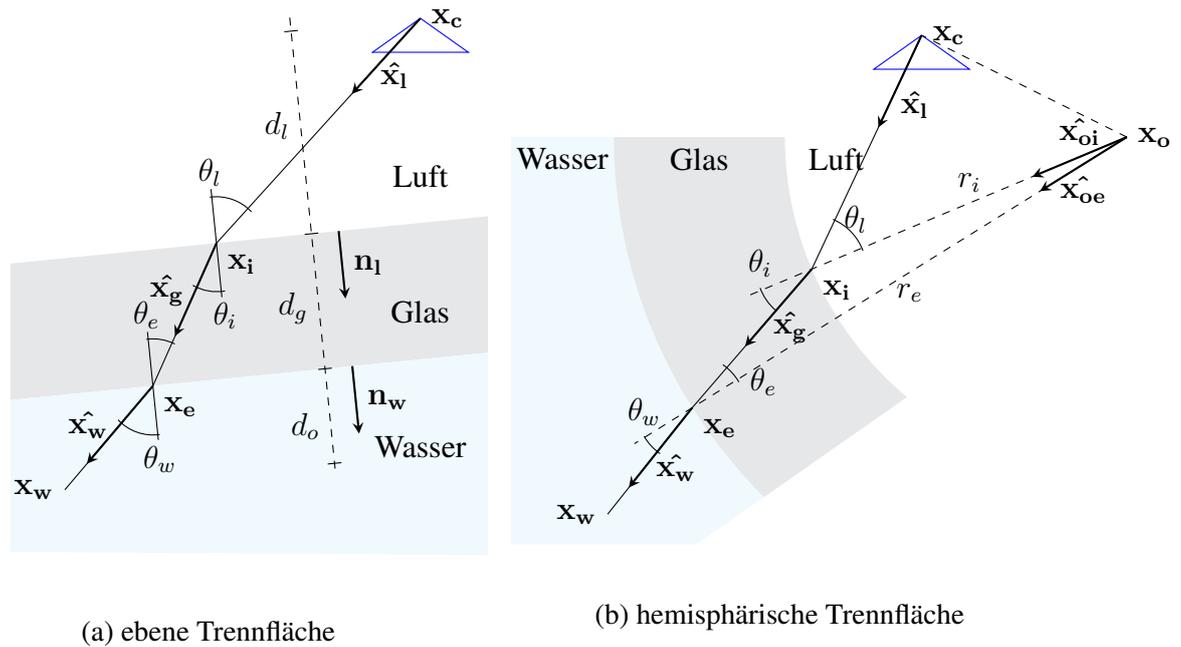


Abbildung 4.2.: Strahlengänge in typischen Unterwasserphotogrammetrieaufbauten

Die in der Unterwasserphotogrammetrie am häufigsten vorzufindenden optischen Aufbauten sind in Abbildung 4.2 mit exemplarischen Strahlverläufen dargestellt. In beiden Systemen bildet das Projektionszentrum der Kamera  $x_c$  den Ursprung des Strahlengangs. Ausgehend vom Ursprung ist ein luftseitiger Richtungsvektor  $\hat{x}_1$  zu definieren, der sich z.B. aus der eingesetzten Kameraoptik ableiten lässt. Der Schnittpunkt des luftseitigen Richtungsvektors  $\hat{x}_1$  mit der ersten Trennfläche ist als  $x_i$  bezeichnet und der Einfallswinkel als  $\theta_l$ . Der Einfallswinkel  $\theta_l$  und Ausfallswinkel  $\theta_i$  sind über das Brechungsgesetz gekoppelt. Durch den Ausfallswinkel  $\theta_i$  lässt sich der Richtungsvektor im Glas  $\hat{x}_g$  errechnen. Im nächsten Schritt kann der Schnittpunkt des Richtungsvektors im Glas mit der zweiten Trennfläche, bezeichnet als  $x_e$ , und der Einfallswinkel  $\theta_e$  ermittelt werden. Erneut ist der Einfallswinkel  $\theta_e$  und Ausfallswinkel  $\theta_w$  über das Brechungsgesetz zu koppeln. Mit Kenntnis der beiden Winkel  $\theta_e$  und  $\theta_w$  kann der wasserseitige Richtungsvektor  $\hat{x}_w$  berechnet werden. Es folgt die detaillierte Beschreibung der Strahlengänge für ebene und hemisphärische Trennflächen.

### 4.3.1. Ebene Trennfläche

Abbildung 4.2a zeigt den Strahlengang eines Systems mit ebener Trennfläche. Die Beschreibung des ebenen Strahlengangs folgt den Ausführungen von Sedlazeck und Koch (2012). Dabei ist die Lage der Trennflächen durch die Abstände von der Kamera zur inneren Trennfläche  $d_l$  und von innerer zu äußerer Trennfläche  $d_g$ , sowie der zugehörigen Trennflächennormalen  $n_1$

#### 4. Optik

und  $\mathbf{n}_w$  beschrieben. Der Schnittpunkt  $\mathbf{x}_i$ , der sich aus der Strahlrichtung  $\hat{\mathbf{x}}_l$  und der Trennfläche Luft-Glas ergibt, ist bestimmt durch:

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{x}_c + \left( \frac{d_l}{\mathbf{n}_l \cdot \hat{\mathbf{x}}_l} \right) \hat{\mathbf{x}}_l \quad (4.1)$$

Der zugehörige Einfallswinkel  $\theta_l$  lässt sich über das Skalarprodukt ermitteln. Der Ausfallwinkel  $\theta_i$  ist durch das Brechungsgesetz und die bekannten Brechungsindizes  $n_l$  und  $n_g$  festgesetzt.

$$\theta_l = \arccos \left( \frac{\mathbf{n}_l \cdot \hat{\mathbf{x}}_l}{\|\mathbf{n}_l\| \|\hat{\mathbf{x}}_l\|} \right) \quad \theta_i = \arcsin \left( \sin \theta_l \frac{n_l}{n_g} \right) \quad (4.2)$$

Der Richtungsvektor des Strahles innerhalb des Glases  $\hat{\mathbf{x}}_g$  entstammt dem um den Betrag  $\theta_{rot,i} = \theta_i - \theta_l$  gedrehten Richtungsvektor  $\hat{\mathbf{x}}_l$ . Vektoriell gesehen ist für eine freie Drehung im Raum eine Rotationsmatrix  $\mathbf{R}_i$  auf die Strahlrichtung  $\hat{\mathbf{x}}_l$  anzuwenden. Die Rotationsmatrix  $\mathbf{R}_i$  kann durch ein Quaternion  $\mathbf{q}_i$  zur Verfügung gestellt werden. Quaternionen  $\mathbf{q}$  erweitern den reellen Zahlenraum auf vier Dimensionen und sind so in der Lage freie Drehungen im Raum eindeutig zu beschreiben (Hofmann, 2009). Das Quaterion entsteht aus der normierten Drehachse  $\mathbf{n}_{rot,i}$  und dem zugehörigen Drehwinkel  $\theta_{rot,i}$  (Hofmann, 2009).

$$\mathbf{n}_{rot,i} = \frac{\hat{\mathbf{x}}_l \times \mathbf{n}_l}{\sin \theta_l} \quad \mathbf{q}_i = \left( \begin{array}{c} \cos \left( \frac{\theta_{rot,i}}{2} \right) \\ \sin \left( \frac{\theta_{rot,i}}{2} \right) \mathbf{n}_{rot,i} \end{array} \right) \quad \mathbf{q}_i \rightsquigarrow \mathbf{R}_i \quad (4.3)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_g = \mathbf{R}_i \hat{\mathbf{x}}_l \quad (4.4)$$

Der im Glas verlaufende Strahl  $\hat{\mathbf{x}}_g$  wird beim Übertritt in die Wasserphase erneut gebrochen, dies geschieht am Übergang von Glas zu Wasser  $\mathbf{x}_e$ .

$$\mathbf{x}_e = \mathbf{x}_i + \left( \frac{d_g}{\mathbf{n}_w \cdot \hat{\mathbf{x}}_g} \right) \hat{\mathbf{x}}_g \quad (4.5)$$

Der zugehörige Einfallswinkel  $\theta_e$  lässt sich über das Skalarprodukt ermitteln. Der Ausfallwinkel  $\theta_w$  ist durch das Brechungsgesetz und die bekannten Brechungsindizes  $n_g$  und  $n_w$  festgesetzt.

$$\theta_e = \arccos \left( \frac{\mathbf{n}_w \cdot \hat{\mathbf{x}}_g}{\|\mathbf{n}_w\| \|\hat{\mathbf{x}}_g\|} \right) \quad \theta_w = \arcsin \left( \sin \theta_e \frac{n_g}{n_w} \right) \quad (4.6)$$

## 4. Optik

Der Richtungsvektor des Strahles im Wasser  $\hat{\mathbf{x}}_w$  beruht auf dem um  $\theta_{rot,e} = \theta_e - \theta_w$  gedrehten Richtungsvektor  $\hat{\mathbf{x}}_g$ . Die vektorielle Transformation erfolgt durch Anwendung der Rotationsmatrix  $\mathbf{R}_e$  auf die Strahlrichtung  $\hat{\mathbf{x}}_g$ .

$$\mathbf{n}_{rot,e} = \frac{\hat{\mathbf{x}}_g \times \mathbf{n}_w}{\sin \theta_e} \quad \mathbf{q}_e = \begin{pmatrix} \cos\left(\frac{\theta_{rot,e}}{2}\right) \\ \frac{\sin\left(\frac{\theta_{rot,e}}{2}\right)}{\|\mathbf{n}_{rot,e}\|} \mathbf{n}_{rot,e} \end{pmatrix} \quad \mathbf{q}_e \curvearrowright \mathbf{R}_e \quad (4.7)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_w = \mathbf{R}_e \hat{\mathbf{x}}_g \quad (4.8)$$

Die Lage eines Punktes im wasserseitigen Objektraum  $\mathbf{x}_w$ , der sich in einem Abstand  $d_o$  zur Glas-Wasser-Trennfläche befindet, ist vektoriell wie folgt definiert.

$$\mathbf{x}_w = \mathbf{x}_e + \left( \frac{d_o}{\mathbf{n}_w \cdot \hat{\mathbf{x}}_g} \right) \hat{\mathbf{x}}_g \quad (4.9)$$

### 4.3.2. Hemisphärische Trennfläche

Die Beschreibung des Strahlengangs für ein System mit hemisphärischen Trennflächen, die als konzentrisch angenommen sind, orientiert sich an Sedlazeck und Koch (2012). Als bekannt vorausgesetzt sind die Radien  $r_i$  und  $r_e$  sowie das Zentrum  $\mathbf{x}_o$  der hemisphärischen Trennflächen, das Kamerazentrum  $\mathbf{x}_c$  und die luftseitige Strahlrichtung  $\hat{\mathbf{x}}_1$ . Die Bestimmung des Schnittpunktes  $\mathbf{x}_i$  erfolgt auf Basis von  $\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_o\| = r_i$ . Dazu wird  $\mathbf{x}_i$  durch  $\mathbf{x}_c + \lambda \hat{\mathbf{x}}_1$  ersetzt und der Ausdruck dann quadriert. Unter Berücksichtigung der Vektorrichtung kann die Nebenbedingung  $\lambda > 0$  aufgestellt und so durch  $\max(\lambda_{1,2})$  eine eindeutige Lösung gefunden werden.

$$\|\mathbf{x}_c + \lambda \hat{\mathbf{x}}_1 - \mathbf{x}_o\|^2 = r_i^2 \quad (4.10)$$

$$\lambda_i^2 \|\hat{\mathbf{x}}_1\|^2 + 2\lambda_i \hat{\mathbf{x}}_1 \cdot (\mathbf{x}_c - \mathbf{x}_o) + \|\mathbf{x}_c - \mathbf{x}_o\|^2 - r_i^2 = 0 \quad (4.11)$$

$$\lambda_{i,1,2} = \frac{-2\hat{\mathbf{x}}_1 \cdot (\mathbf{x}_c - \mathbf{x}_o) \pm \sqrt{(4\hat{\mathbf{x}}_1 \cdot (\mathbf{x}_c - \mathbf{x}_o))^2 - 4\|\hat{\mathbf{x}}_1\|^2 (\|\mathbf{x}_c - \mathbf{x}_o\|^2 - r_i^2)}}{2\|\hat{\mathbf{x}}_1\|^2}$$

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{x}_c + \max(\lambda_{i,1,2}) \hat{\mathbf{x}}_1 \quad (4.12)$$

Der Einfallswinkel  $\theta_l$  lässt sich über das Skalarprodukt ermitteln. Der Ausfallwinkel  $\theta_i$  ist durch das Brechungsgesetz und die bekannten Brechungsindizes  $n_l$  und  $n_g$  festgelegt.

$$\theta_l = \arccos\left(\frac{(\mathbf{x}_c - \mathbf{x}_i) \cdot (\mathbf{x}_o - \mathbf{x}_i)}{\max(\lambda_{i,1-2}) r_i}\right) \quad \theta_i = \arcsin\left(\sin \theta_l \frac{n_l}{n_g}\right) \quad (4.13)$$

Der Richtungsvektor des Strahles innerhalb des Glases  $\hat{\mathbf{x}}_g$  entstammt dem um den Betrag  $\theta_{rot,i} = \theta_i$  gedrehten Richtungsvektor  $\hat{\mathbf{x}}_{oi}$ . Zur Rotation kommen wie schon bei den ebenen

#### 4. Optik

Trennflächen Quaternionen zum Einsatz, die über die normierte Drehachse  $\mathbf{n}_{\text{rot},i}$  und dem zugehörigen Drehwinkel  $\theta_{\text{rot},i}$  definiert sind.

$$\mathbf{n}_{\text{rot},i} = \frac{\hat{\mathbf{x}}_{\text{oi}} \times \hat{\mathbf{x}}_{\text{a}}}{\sin \theta_l} \quad \mathbf{q} = \begin{pmatrix} \cos\left(\frac{\theta_{\text{rot},i}}{2}\right) \\ \frac{\sin\left(\frac{\theta_{\text{rot},i}}{2}\right)}{\|\mathbf{n}_{\text{rot},i}\|} \mathbf{n}_{\text{rot},i} \end{pmatrix} \quad \mathbf{q} \curvearrowright \mathbf{R}_i \quad (4.14)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{\text{g}} = \mathbf{R}_i \hat{\mathbf{x}}_{\text{oi}} \quad (4.15)$$

Der im Glas verlaufende Strahl  $\hat{\mathbf{x}}_{\text{g}}$  wird beim Übertritt in die Wasserphase erneut gebrochen, dies geschieht am Übergang von Glas zu Wasser  $\mathbf{x}_e$ . Die Bestimmung des Schnittpunktes  $\mathbf{x}_e$  erfolgt analog dem Vorgehen zur Bestimmung von  $\mathbf{x}_i$ . Die Basis bildet  $\|\mathbf{x}_e - \mathbf{x}_o\| = r_e$ . Durch Substitution von  $\mathbf{x}_e$  mit  $\mathbf{x}_i + \lambda_e \hat{\mathbf{x}}_{\text{g}}$  und anschließendem beidseitigem Quadrieren folgt:

$$(\mathbf{x}_i + \lambda_e \hat{\mathbf{x}}_{\text{g}} - \mathbf{x}_o)^2 = r_e^2 \quad (4.16)$$

$$\lambda_{e1,2} = \frac{-2(\hat{\mathbf{x}}_{\text{g}} \cdot (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_o)) \pm \sqrt{4(\hat{\mathbf{x}}_{\text{g}} \cdot (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_o))^2 - 4\|\hat{\mathbf{x}}_{\text{g}}\|^2(\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_o\|^2 - r_e^2)}}{2\|\hat{\mathbf{x}}_{\text{g}}\|^2}$$

$$\mathbf{x}_e = \mathbf{x}_i + \max(\lambda_{e1,2}) \hat{\mathbf{x}}_{\text{g}} \quad (4.17)$$

Der zugehörige Einfallswinkel  $\theta_e$  lässt sich über das Skalarprodukt ermitteln. Der Ausfallwinkel  $\theta_w$  ist durch das Brechungsgesetz und die bekannten Brechungsindizes  $n_g$  und  $n_w$  festgesetzt.

$$\theta_e = \arccos\left(\frac{(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_e) \cdot (\mathbf{x}_o - \mathbf{x}_e)}{\max(\lambda_{e1,2}) r_e}\right) \quad \theta_w = \arcsin\left(\sin \theta_e \frac{n_g}{n_w}\right) \quad (4.18)$$

Der Richtungsvektor des Strahles im Wasser  $\hat{\mathbf{x}}_{\text{w}}$  beruht auf dem um  $\theta_{\text{rot},e} = \theta_w$  gedrehten Richtungsvektor  $\hat{\mathbf{x}}_{\text{oe}}$ . Zur vektoriellen Transformation wird die Rotationsmatrix  $\mathbf{R}_e$  auf die Strahlrichtung  $\hat{\mathbf{x}}_{\text{g}}$  angewandt.

$$\mathbf{n}_{\text{rot},e} = \frac{\hat{\mathbf{x}}_{\text{oe}} \times \hat{\mathbf{x}}_{\text{g}}}{\sin \theta_w} \quad \mathbf{q}_e = \begin{pmatrix} \cos\left(\frac{\theta_{\text{rot},e}}{2}\right) \\ \frac{\sin\left(\frac{\theta_{\text{rot},e}}{2}\right)}{\|\mathbf{n}_{\text{rot},e}\|} \mathbf{n}_{\text{rot},e} \end{pmatrix} \quad \mathbf{q}_e \curvearrowright \mathbf{R}_e \quad (4.19)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{\text{w}} = \mathbf{R}_e \hat{\mathbf{x}}_{\text{oe}} \quad (4.20)$$

Die Lage eines Punktes im wasserseitigen Objektraum  $\mathbf{x}_w$  ist vektoriell wie folgt definiert.

$$\mathbf{x}_w = \mathbf{x}_e + \lambda_w \hat{\mathbf{x}}_{\text{w}} \quad (4.21)$$

#### 4.4. Kaustik (Brennfläche)

Mit Kenntnis der Brennflächen lassen sich die Eigenschaften eines optischen Aufbaus besser verstehen (Grossberg und Nayar, 2005). Insbesondere helfen sie bei der Beurteilung, inwieweit die Abbildung im Mehrmedienfall von einer in der Photogrammetrie normalerweise angenommenen zentralperspektivischen Abbildung abweicht (Sedlazeck und Koch, 2012). Unter perfekten zentralperspektivischen Bedingungen schneiden sich alle Abbildungsstrahlen im Brennpunkt. In der Praxis artet dieser infolge von Imperfektionen zu einer Brennfläche aus. Ausgehend von der Abbildung eines nichthomozentrischen, infinitesimalen Strahlenbündels zeigt Born, dass durch Brechung oder Spiegelung die Strahlen nicht in einem Punkt, sondern in zwei Brennlinien, die Teil zweier Brennflächen sind, abgebildet werden (Born, 1972). Bei eindimensionaler Betrachtung oder rotationssymmetrischen Trennflächen entartet eine der beiden Brennflächen zu einem Stück der Achse. Die Einhüllende der bildseitig verlaufenden Strahlen wird im Allgemeinen als Kaustik oder Brennfläche bezeichnet (Litfin, 2005).

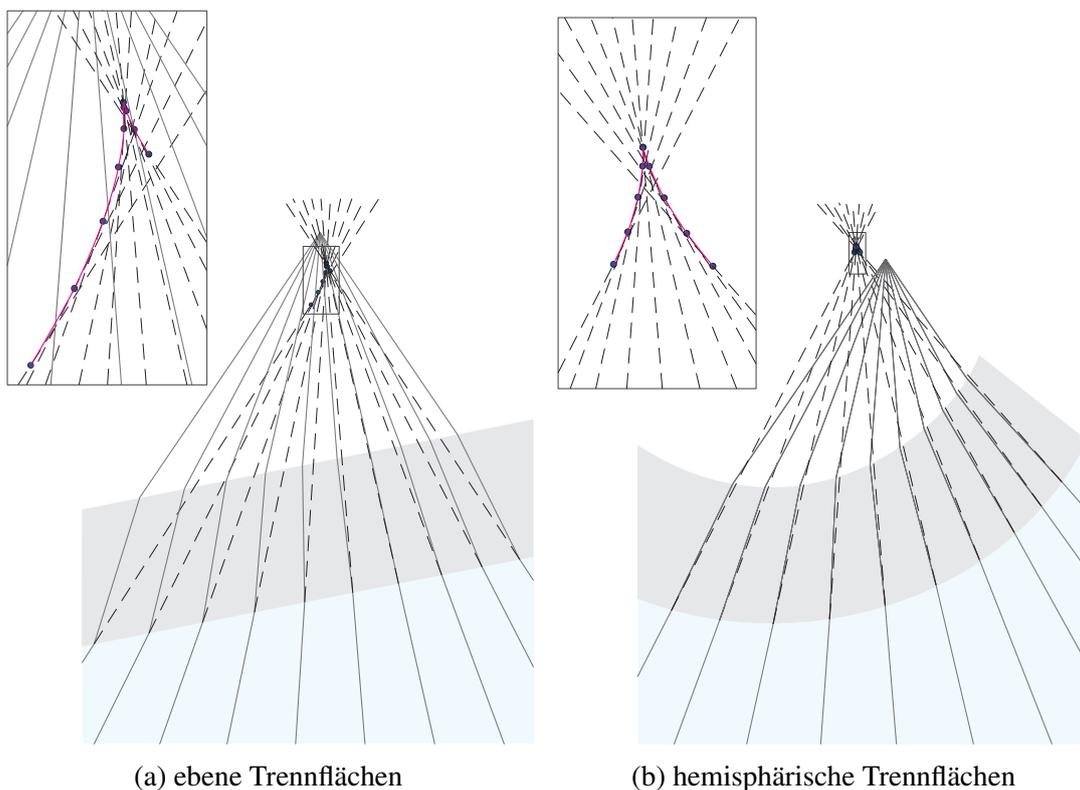


Abbildung 4.3.: Strahlengänge im Mehrmedienfall für ein Strahlenbündel mit ca.  $70^\circ$  Öffnungswinkel bei ebenen, parallelen und geneigten Trennflächen (links) und kugelförmigen Trennflächen (rechts); die durchgezogenen Linien zeigen die Strahlwege ausgehend vom Kamerazentrum; die gestrichelten Linien sind die geradlinigen Verlängerungen des objektseitig, im Wasser befindlichen Strahlenbündels und jeweils einer Vergrößerung auf den Bereich der Brennfläche

## 4. Optik

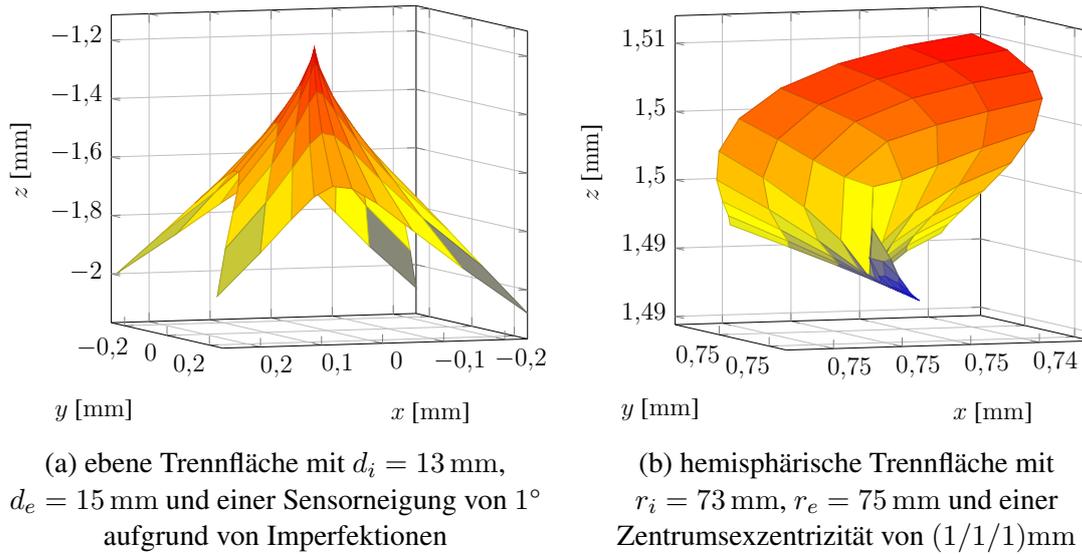


Abbildung 4.4.: Kaustische Flächen für ein ebenes und hemisphärisches Trennflächenszenario, die übliche Aufnahmesituationen nachstellen; beide Trennflächenszenarien nutzen ein identisches Strahlenbündel, das an das später eingesetzte Objektiv angelehnt ist. Die kaustischen Flächen sind mit ihren Höhenwerten eingefärbt, um die räumliche Vorstellung zu erleichtern.

Im Mehrmedienfall spannen die imaginär geradlinig verlängerten Objektraumstrahlen eine kaustische Fläche auf (Wolff, 2007, Treibitz et al., 2012), anhand derer die Abweichung zur Zentralperspektive beschrieben werden kann (Jordt, 2014). Beispiele für Kaustiken im Mehrmedienfall mit ebener und hemisphärischer Trennfläche sind in Abbildung 4.3 zu finden.

Die Kaustiken einfacher Systeme sind analytisch ableitbar, indem die Singularitäten der parametrisierten Abbildungsvorschrift, die den Zusammenhang zwischen Kamera- und Objektraumkoordinaten beschreibt, berechnet werden (Grossberg und Nayar, 2005). Zur Bestimmung der Singularitäten ist die Determinante der Jacobi-Matrix auf Null zu setzen (Born und Wolf, 1970). Für einfache Fälle, bei denen die optische Achse lotrecht auf der Trennfläche steht, existieren analytische Formulierungen der Brennflächen (Treibitz et al., 2012). Um Kaustiken komplexerer Systeme zu berechnen, werden numerische Verfahren, die die Jacobi-Matrix approximieren und zu Null setzen, angewandt (Singh et al., 2012, Sedlazeck und Koch, 2012). Im Zuge von Arbeiten rund um die Visualisierung von Kaustiken wurde die Idee eines geometrischen Näherungsmodells geboren. Das geometrische Näherungsmodell approximiert die Kaustik an diskreten Stützstellen mit Hilfe eines Strahlentripels. Eine detaillierte Beschreibung hierzu findet sich im Anhang A.1. In Abbildung 4.4 sind die Ergebnisse des Näherungsmodells für zwei Trennflächenszenarien dargestellt. Hieraus ist ersichtlich, dass die Kaustik der ebenen Trennfläche betragsmäßig zwar größer, aber die Form der hemisphärischen Kaustik komplexer ausfällt. Mit Hinblick auf die Verzeichnungsmuster bedeutet das, dass für die ebenen Trennflächen betragsmäßig größere Verzeichnungen zu erwarten sind und die hemisphärische Trennflä-

#### 4. Optik

che im Gegenzug kompliziertere Verzeichnungsmuster aufzeigen. Diese Erwartungen werden im Abschnitt 4.5 bestätigt. Eine direkte Umrechnung, die von den geometrischen Abmessungen der Kaustik direkt auf die Bild-Verzeichnungen schließen lassen würde, wurde gemäß dem Kenntnisstand des Autors bislang noch nicht publiziert.

Für einen quantitativen Vergleich der Kaustiken wurden vier dimensionslose Kenngrößen definiert, siehe Anhang A.2. Diese beziehen sich auf den Schwerpunkt, die Oberfläche, das Volumen und die Raumdiagonale. In Tabelle 4.1 sind die dimensionslosen Parameter der beiden Trennflächenszenarien gegenübergestellt, dabei wurde ein identisches Strahlenbüschel angesetzt, das dem in den durchgeführten Versuchen tatsächlich verbauten 12,5 mm Objektiv nachempfunden ist. Der dimensionslose Abstand  $cd$  zwischen dem geometrischen Schwerpunkt und dem Kamerazentrum gibt Aufschluss, wie weit die Brennfläche vom Kameraursprung entfernt liegt. Die dimensionslose Oberfläche  $cs$  und das dimensionslose Volumen  $cv$  charakterisieren die Kaustik hinsichtlich der räumlichen Ausdehnung. Die dimensionslose Raumdiagonale  $sd$  charakterisiert die Kompaktheit der Kaustik. Die Zahlenwerte der Tabelle 4.1 und die Abmessungen der Kaustiken in Abbildung 4.3 belegen, dass die hemisphärische Kaustik sehr kompakt, aber vergleichsweise weit vom Zentrum zum Liegen kommt, wodurch die Annahme einer perspektivischen Abbildung verletzt wird.

Die Kaustiken der ebenen Trennflächen sind in ihrer Form und Struktur gegenüber den Brennflächen der hemisphärischen Trennflächen klar und einfach. Das dürfte ein Grund sein, warum ebenen Trennflächen der Vorzug gegeben wird, vor allem dann, wenn das zugehörige Unterwassermodell auf den Kaustiken aufbaut. Aus Sicht der Bildqualität wären jedoch hemisphärische Linsen vorzuziehen, da diese bei korrekter Ausrichtung das Bild weniger stark und zudem gleichmäßiger verzerren. Da für die Unterwassergehäuse, die in den Versuchen eingesetzt werden sollen, unterschiedliche hemisphärische Vorsatzlinsen zur Auswahl standen, wurde das Brennflächenverhalten hinsichtlich der Trennflächenradien und den später zu erwartenden Einbautoleranzen, die für alle Szenarien gleich angenommen wurden, untersucht. Die Ergebnisse in Abbildung 4.5 sind über die dimensionslose Verschiebung  $ndt$ , die den Abstand zwischen Kamera- und Linsenzentrum auf die mittlere Trennflächenentfernung  $sp_m$ , siehe Anhang A.2, bezieht, aufgetragen. Je kleiner die dimensionslose Verschiebung, desto geringer ist auch der Abstand zwischen Ursprung und dem Schwerpunkt der Kaustik, siehe Abbildung 4.5a. Im Gegensatz zum dimensionslosen Abstand  $cd$  zeigen die dimensionslosen Größen  $cs$ ,  $cv$  und  $sd$  ein ausgeprägtes schweifartiges Verhalten, das durch die anisotropisch wirkenden Einbautoleranzen begründet ist. Die Anteile der axialen und tangentialen Verschiebung variieren. Dabei verursachen die stärker wirkenden tangentialen Verschiebungen, dass es zu einer Auffächerung kommt. Ein ganz ähnliches Bild zeichnet der nachfolgende Abschnitt, der die Verzeichnung behandelt. Aus den Abbildungen 4.5 kann die Erkenntnis gezogen werden, dass größere Radien der hemisphärischen Vorsatzlinsen mit ihren kleineren relativen Verschiebungen vorteilhaft

## 4. Optik

Tabelle 4.1.: Dimensionslose Kenngrößen der Kaustiken eines ebenen und eines hemisphärischen Systems; das ebene System ist durch  $d_i = 12$  mm,  $d_e = 15$  mm und einer Achsabweichung von einem Grad beschrieben; die hemisphärische Trennflächen wurden mit einem inneren Radius  $r_i = 73$  mm, äußerem Radius  $r_e = 75$  mm und einer Zentrumsexzentrizität von  $(1/1/1)$  mm modelliert;  $cd$  dimensionsloser Abstand zwischen Schwerpunkt und Kamerazentrum,  $cs$  dimensionslose Oberfläche,  $cv$  dimensionsloses Volumen und  $sd$  dimensionslose Raumdiagonale

Trennflächentyp	$cd[-]$	$cs[-]$	$cv[-]$	$sd[-]$
eben	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$9,4 \cdot 10^{-5}$	$8,4 \cdot 10^{-2}$
hemisphärisch	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$4,9 \cdot 10^{-7}$	$1,4 \cdot 10^{-10}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$

sind, da so größere Einbautoleranzen gestattet sind. Auf der anderen Seite tauchen Vorsatzlinsen mit größeren Radien auch tiefer ins Wasser ein und stören so die Strömung. Als technischer und wirtschaftlicher Kompromiss wurden hemisphärische Vorsatzlinsen aus dem Privatanwendungsbereich verbaut. Sie weisen einen mittleren Trennflächenradius von ca. 75 mm auf und sind aus Plexiglas gefertigt, das gut weiterverarbeitet werden kann.

### 4.5. Verzeichnung

Durchqueren Lichtstrahlen komplexe Linsensysteme, wie sie etwa durch Objektive gegeben sind, weichen mit hoher Wahrscheinlichkeit die Eintritts- und Austrittswinkel voneinander ab, verursacht durch Imperfektionen der Linsen und deren Zentrierung (Luhmann, 2018). Die im Bildbereich variierende Strahlablenkung bedingt, dass der Abbildungsmaßstab innerhalb des Bildes variiert (Litfin, 2005). Für eine maßstabstreuere Abbildung sind deshalb die Lageverschiebungen, die infolge der Unterschiede zwischen Ein- und Austrittswinkel entstehen, durch ein geeignetes Verzeichnungsmodell zu korrigieren.

Die Verzeichnungen weisen je nach Aufbau des Linsensystems und dessen Imperfektionen charakteristische Formen auf. Radialsymmetrische Verzeichnungsmuster entstehen durch Brechungsänderungen an den Linsen und hängen von Wellenlänge, Blendeneinstellung, Fokussierung und Objektentfernung bei konstanter Fokussierung ab. Radialasymmetrische und tangentiale Verzeichnungen sind die Folge dezentrierter Linsen. Affinität und Scherung sind Folgeerscheinungen ungleichmäßig angeordneter Sensorelemente oder nicht quadratischer Pixel. In der Praxis treten die Verzeichnungsmuster meist in Kombination auf, wobei bei hochwertigen Objektiven die radialsymmetrische Komponente dominiert (vgl. Luhmann, 2018).

Fertigungstoleranzen machen eine perfekte Linsenzentrierung nahezu unmöglich. Tatsächlich streut die Lage der Zentren um die optische Achse. Eine Linsendezentrierung ruft im wesentlichen drei Erscheinungen hervor, die Koma, den Astigmatismus sowie radial und tangentiale

## 4. Optik

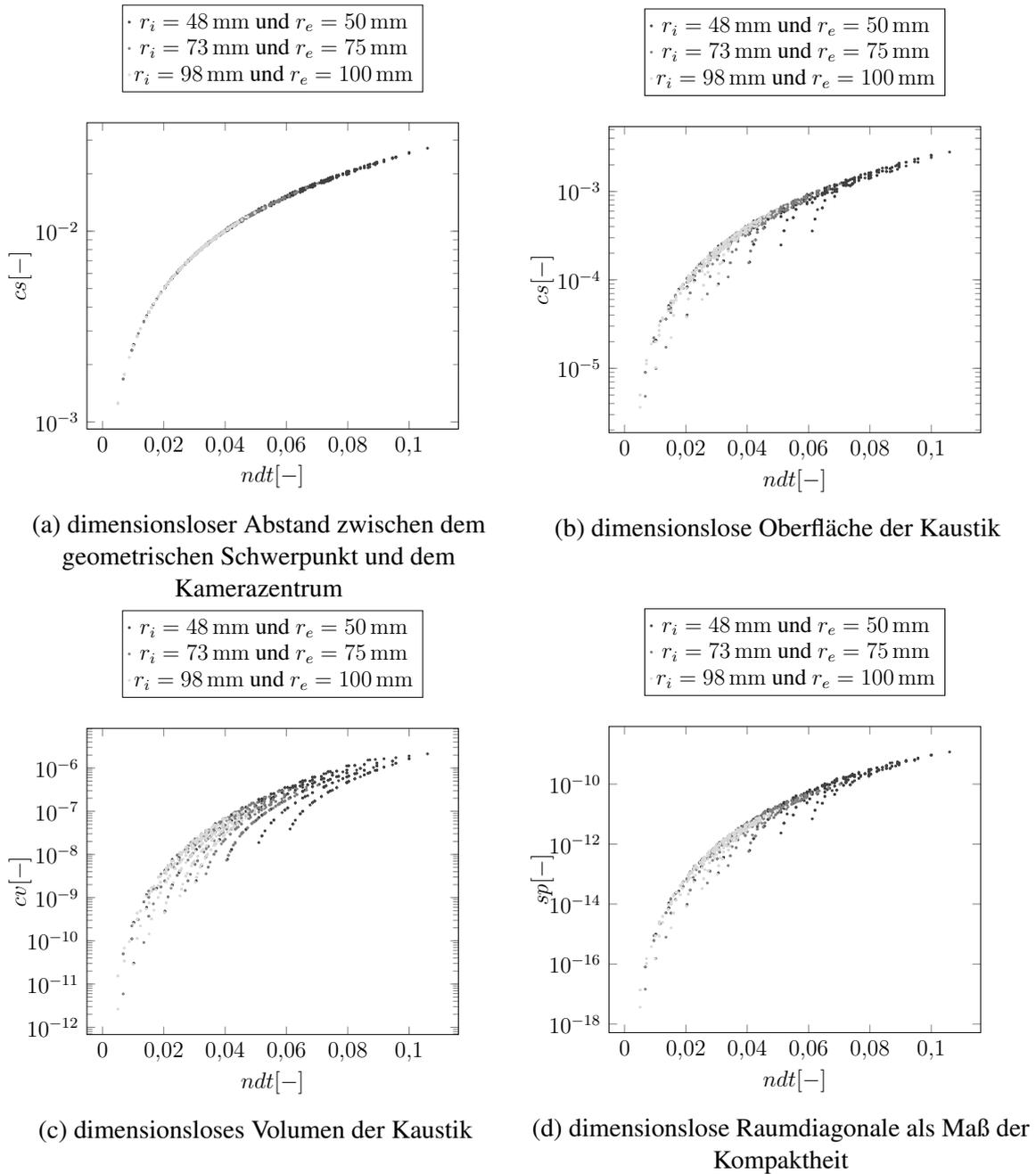


Abbildung 4.5.: Einflüsse der Trennflächenradien und Einbautoleranzen auf die dimensionslosen Größen der Kaustik; die absoluten Exzentrizitäten aller Szenarien variieren zwischen (0/0/0) und (2/2/2) [mm]

#### 4. Optik

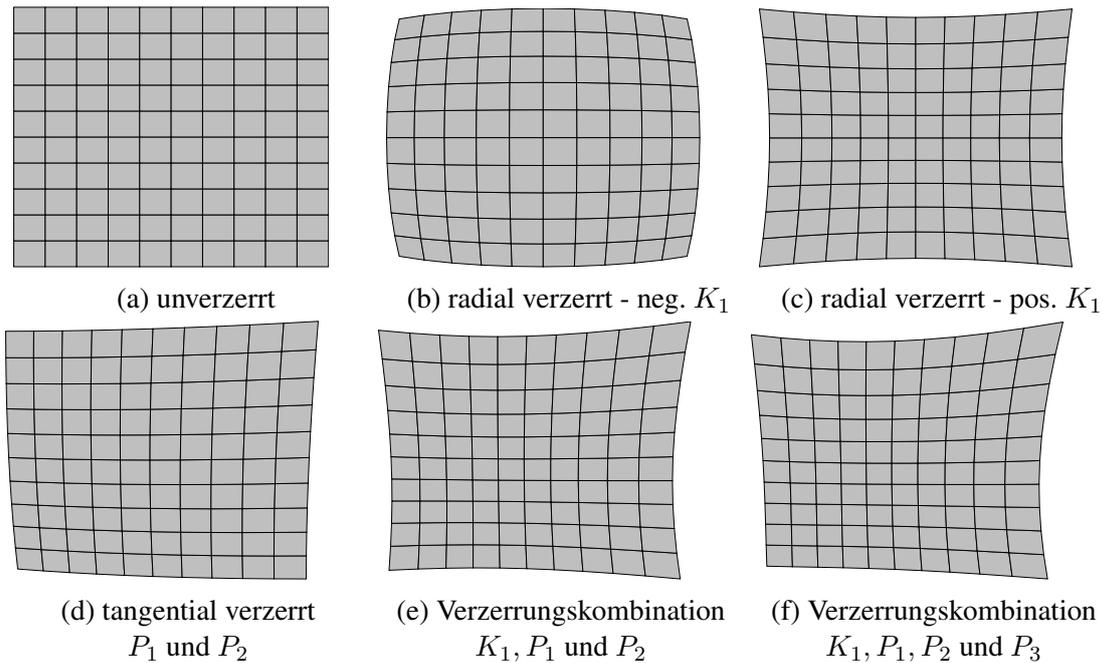


Abbildung 4.6.: Typische Verzeichnungsmuster, die durch das Brown-Conrady-Modell mathematisch beschrieben sind.

Verzeichnungen. Die Koma bemisst den Asymmetriefehler und der Astigmatismus ist die Folge unterschiedlicher Brennweiten, die zu Verlusten in der Schärfe führt. Die radialen und tangentialen Verzeichnungen nehmen den größten Einfluss auf die Bildqualität, indem Sie starke Verschiebungen im Bild hervorrufen (vgl. Conrady, 1919).

Das Brown-Conrady-Modell (Brown, 1966) dürfte das am weitesten verbreitete mathematische Verzeichnungsmodell sein. Nahezu alle Veröffentlichungen nutzen oder bauen auf diesem Modell auf. Die Parameter  $K_1, K_2, K_3$  in Gl. 4.22 beschreiben die radialsymmetrischen Verzeichnungsanteile und die Parameter  $P_1, P_2, P_3, P_4$  die tangentialen. Die damit darstellbaren Verzeichnungsmuster sind in Abbildung 4.6 illustriert. Im ursprünglichen Modellansatz von Brown-Conrady werden die Verzeichnungsparameter als konstant angesehen. Sowohl Anwendungen mit erhöhten Genauigkeitsanforderungen (Dold, 1997) als auch der Mehrmedienfall erfordern die Berücksichtigung der Veränderlichkeiten von Verzeichnungsparametern.

$$\begin{aligned}
 x_u &= x_d + x'(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) + (P_1(r^2 + 2x'^2) + 2P_2 x' y')(1 + P_3 r^2 + P_4 r^4) \\
 y_u &= y_d + y'(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) + ((2P_1 x' y') + P_2(r^2 + 2y'^2))(1 + P_3 r^2 + P_4 r^4) \\
 r &= \sqrt{(x_d - x_c)^2 + (y_d - y_c)^2} \quad x' = (x_d - x_c) \quad y' = (y_d - y_c)
 \end{aligned} \tag{4.22}$$

## 4. Optik

### 4.5.1. Veränderliche Verzeichnungsparameter

Strenggenommen hängen die Brown'schen Verzeichnungsparameter von der Aufnahmesituation ab und ändern sich, sobald die Brennweite, Blendeneinstellung, Fokussierung oder Objektentfernung bei konstanter Fokussierung verändert wird. Hochgenaue Messaufgaben erfordern eine Nachführung der Verzeichnungsparameter durch das eingesetzte Verzeichnungsmodell (Dold, 1997, Bräuer-Burchardt et al., 2006, Alvarez et al., 2011).

Den Grundstein zur Beschreibung der fokusabhängigen Verzeichnungsparameter legte Magill (1955) mit seinem Korrekturmodell, das die Verzeichnungsparameter für beliebige Fokuseinstellungen aus a priori bestimmten Verzeichnungsparametern für Nah- und Unendlichkeitseinstellung eines Objektivs ermittelt. Brown vereinfachte Magill's Korrekturmodell, wodurch fortan auf zwei beliebig gewählte Fokusebenen zurückgegriffen werden konnte, was der Praxistauglichkeit zu Gute kam. Zudem erweiterte Brown (1971) das Modell, um den Einfluss der Objektentfernung bei konstanter Fokussierung erfassen zu können. Dies geschieht, indem eingangs näherungsweise die Objektraumkoordinaten und deren Abstände zur Fokusebene berechnet werden und dann auf Grundlage dieser Abstände eine Verzeichnungs Korrektur vorgenommen wird. Fraser und Shortis (1992) erweiterten das Magill-Brown'sche Korrektionsmodell um einen experimentell zu bestimmenden Korrekturfaktor, so ließen sich von ihnen identifizierte Schwächen des Modells abfedern. Durch die Verschmelzung und Optimierung der Modelle von Magill, Brown und Fraser lässt sich die entfernungsabhängige Korrektur leichter implementieren (Alvarez et al., 2011, Sun et al., 2017). Das von Kotowski (1987) formulierte Mehrmedienmodell, das direkt in die Bündelblockausgleichung mit Simultanausgleichung integrierbar ist, nutzt ebenfalls eine entfernungsabhängige Verzeichnungsbeschreibung. Für Anwendungen mit kleinen Bildmaßstäben ergeben sich durch die Berücksichtigung der Entfernungsabhängigkeiten signifikante Verbesserungen (Dold, 1997). Obgleich die Fokusabhängigkeit der Verzeichnungsparameter seit über 60 Jahren bekannt ist, verzichten selbst modernste Structure-from-Motion Softwareprodukte darauf, diese in den Verarbeitungsprozess zu integrieren. Ein Grund dürfte sein, dass dies nur für Systeme höchster Genauigkeit erforderlich ist und zusätzliche Arbeitsschritte notwendig sind, die dem Standardanwender erspart werden sollen. Neben fokusabhängigen Verzeichnungsmodellen existieren auch brennweitenabhängige Verzeichnungsmodelle, die in der Lage sind Bilder mit variabler Brennweite zu verarbeiten (Fraser et al., 2012). Sie sind durch spezielle Methoden zu kalibrieren, im Rahmen dieser Arbeit aufgrund der eingesetzten Festbrennweiten jedoch nicht weiter von Belang.

Lookup-Tabellen oder Verzeichnungsmatrizen bieten eine Alternative zu klassischen, mathematischen Verzeichnungsmodellen (Maas, 1992b, Bräuer-Burchardt et al., 2006). In den Tabellen bzw. Matrizen werden die diskreten Verzeichnungswerte, die den horizontalen und vertikalen Lageverschiebungen entsprechen, vorgehalten. Mit ausreichend vielen Stützstellen lässt sich

## 4. Optik

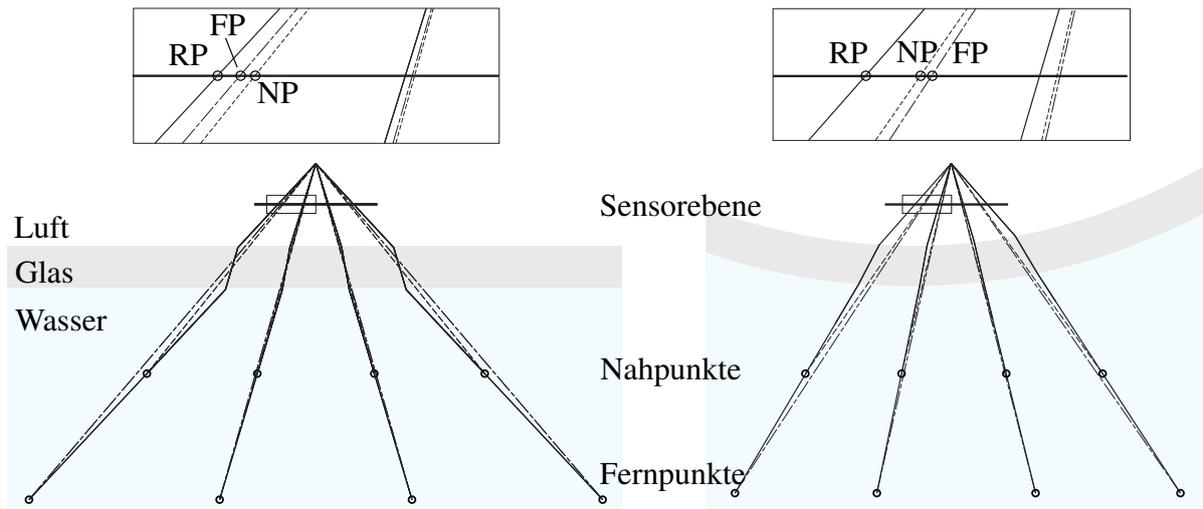


Abbildung 4.7.: Strahlengang im Mehrmedienfall für ein identisches Strahlenbündel; ebene, parallele Trennflächen (links) und hemisphärische Trennflächen (rechts); die durchgezogenen Linien illustrieren die tatsächlichen Strahlwege ausgehend vom Kamerazentrum; die gestrichelten Linien repräsentieren die Strahlwege eines Einmedien-Ansatzes; die vergrößerten Ausschnitte der Sensorfläche lassen die Unterschiede bei der Sensorpassage erkennen und erklären wahrgenommene Lageverschiebungen der Pixelkoordinaten.

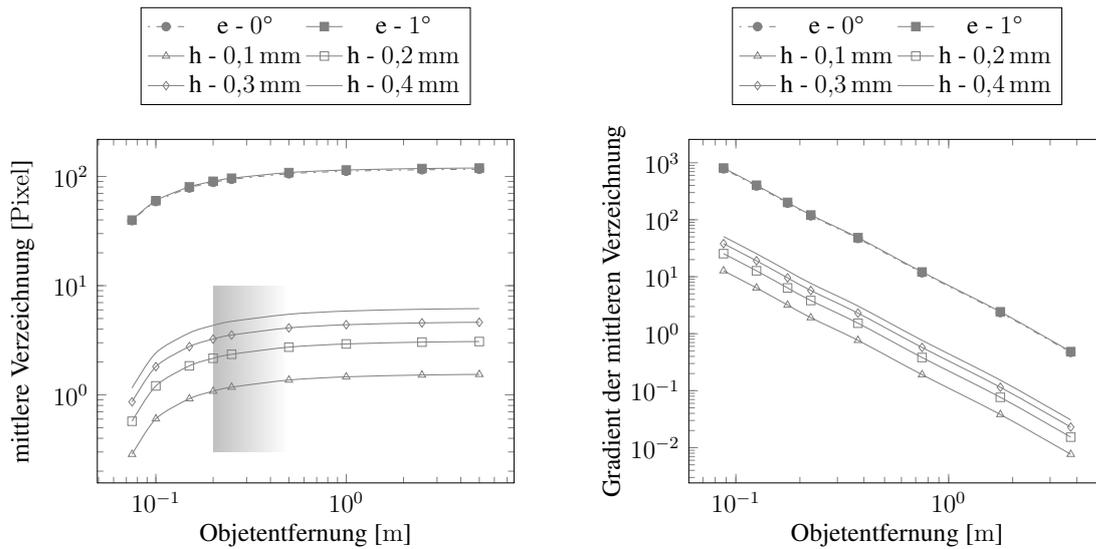
so jegliche Form beliebig komplexer Verzeichnungsmuster erfassen. Auf diesem Wege sind selbst lokale Verzeichnungserscheinungen beschreibbar. Die Bestimmung der diskreten Verzeichnungswerte erfordert spezielle Kalibrierungsverfahren. Die Verzeichnungswerte eines beliebigen, zwischen diskreten Stützstellen liegenden Bildpunktes sind durch geeignete Interpolationsverfahren zu ermitteln. Liegen die diskreten Verzeichnungswerte für verschiedene Aufnahmeabstände vor, so kann aus ihnen eine dreidimensionale Verzeichnungsmatrix gebildet werden. Darauf angewandte räumliche Interpolationsverfahren liefern die entfernungsabhängigen Verzeichnungen (vgl. Maas, 1992b, Bräuer-Burchardt et al., 2006).

Gut konditionierte Anwendungen kommen in der Einmedien-Photogrammetrie, sofern kein Höchstmaß an Genauigkeit gefordert ist, ohne die Beschreibung der veränderlichen Verzeichnungen aus. Im Mehrmedienfall bewirken die Effekte an den Trennflächen eine signifikante Zunahme der Abstandsabhängigkeit, die bei Nichtbeachtung massive Verluste der Modellqualität zur Folge haben können.

### 4.5.2. Abstandsabhängige Verzeichnungsmuster im Mehrmedienfall

Ist der Strahlengang im Mehrmedienfall nicht direkt im photogrammetrischen Modell verankert, mindern abstandsabhängige Verzeichnungen die Modellqualität der Rekonstruktion. Unterwasserphotogrammetrische Modelle, die den gebrochenen Strahlweg korrekt modellieren (Kotowski, 1987) oder durch Zusatzmodelle im Modell berücksichtigen (Jordt, 2014), sind

## 4. Optik



(a) Die maximale Verzeichnung aufgetragen über die Objektentfernung (b) Der Gradient der maximalen Verzeichnung aufgetragen über die Objektentfernung

Abbildung 4.8.: Abstandsabhängigkeit der Verzeichnungen für zwei Systeme mit ebenen Trennflächen (e) und vier Systeme mit hemisphärischen Trennflächen (h). Die Kamerazentren der ebenen Systeme liegen 30 mm von der inneren Trennfläche entfernt, die Kameraachse ist darauf lotrecht bzw. mit  $1^\circ$  Abweichung ausgerichtet. Die ebene Trennfläche ist 3 mm stark.

Die hemisphärischen Szenarien besitzen 75 mm Abstand zwischen Kamerazentrum und Trennfläche und sind 2 mm stark. Zudem wurden diese leicht exzentrisch mit einer in x- und z-Richtung gleichen Verschiebung angenommen. Die ausgewerteten Objekte sind eben und die Objektentfernung ist als senkrechter Abstand vom Projektionszentrum zu den Aufnahmeebenen definiert.

rar. Von konventionellen Einmedien-Modellen verarbeitete Unterwasseraufnahmen sind durch ausgeprägte Verzeichnungen geprägt (Lavest et al., 2003, Shortis, 2015). Für die Kalibrierung von Einmedien-Modellen im Mehrmedienfall sind entweder die in Luft gewonnenen Parameter zu skalieren (Lavest et al., 2003) oder der Aufbau direkt unter Wasser zu kalibrieren (Fryer und Brown, 1986, Bertin et al., 2013), wobei der Gültigkeitsbereich durch die Abstandsabhängigkeit eingeschränkt ist (Shortis, 2015). Die Abbildung 4.7 illustriert die abstandsabhängigen Lageverschiebungen auf der Sensorebene. Obwohl die Abstandsabhängigkeit der Unterwasser-Verzeichnung bekannt ist, verleiten moderne kommerzielle Photogrammetrie-Produkte, mit ihren äußerst robusten und fehlertoleranten Algorithmen, die selbst unter widrigsten Bedingungen noch schön aussehende Modelle liefern, dazu, sie ohne all zu großen Bedacht einzusetzen.

Um die Auswirkungen der Objektentfernung auf die Verzeichnung näher zu untersuchen, wurden zwei ebene und vier hemisphärische Trennflächen-Szenarien simuliert. Die beiden ebenen Trennflächen-Szenarien unterscheiden sich lediglich durch eine im zweiten Szenario angenommene Sensorverkipfung von einem Grad. Die hemisphärischen Trennflächen-Szenarien vari-

#### 4. Optik

ieren die x-z-Exzentrizität räumlich isotrop zwischen 0,1 und 0,4 mm. Als Ergebnis sind in Abbildung 4.8a die maximal auftretenden Verzeichnungen in Abhängigkeit zu der Objektentfernung aufgetragen. Für die Auswertung wurde ein Strahlenbündel mit  $56^\circ$  Öffnungswinkel, ähnlich dem in den durchgeführten Versuchen eingesetzten Objektiv, angesetzt. Daraus wurde der längste Bildraumvektor, der auf Sensorebene zwischen den Durchgangspunkten von gebrochenem und geradlinigem Strahl entsteht, berechnet. Die Charakteristiken der abstandsabhängigen maximalen Verzeichnungen ähneln sich. Auf dem ersten Meter verändern sich die Verzeichnungen noch sehr stark, klingen aber ab einer Objektentfernung von ungefähr einem Meter sehr stark ab. Aufgrund der log-log-Darstellung sollte für die ebenen Trennflächen beachtet werden, dass die absolute Abstandsabhängigkeit um ein Vielfaches höher ausfällt. Bei dem im wasserbaulichen Versuchswesen interessanten Bereich zwischen 0,2 m und 0,5 m, grau hinterlegt in Abbildung 4.8a, ist die Abstandsabhängigkeit noch nicht abgeklungen. Die Gradienten der maximalen Verzeichnungen, dargestellt in Abbildung 4.8b, zeigen in dem log-log-Plot eine lineare Abnahme.

In unterwasserarchäologischen Aufzeichnungen ist in aller Regel ein ausreichend großer Abstand zum Objekt vorhanden, weshalb die Abstandsabhängigkeit eine untergeordnete Rolle spielt und viele unterwasserarchäologische Auswertungen Einmedienmodelle einsetzen. Bei wasserbaulichen Modellversuchen ist von einem größeren Effekt auszugehen, da diese in der Regel mit Wassertiefen von wenigen Dezimetern betrieben werden.

In Tabelle 4.2 sind die abstandsabhängigen Verzeichnungen für bereits publizierte Aufnahme-konfigurationen nachgerechnet worden. Auf Basis der in den Publikationen verfügbaren Angaben zu Brennweite, Wassertiefe und Objektabstand wurden die maximalen Verzeichnungen bei einer angenommenen Änderung des Objektabstandes von  $\pm 25$  mm berechnet. Als Vergleichsbasis dient ein 1-Zoll-Sensor mit einer Pixelgröße von  $4,8 \mu\text{m}$ . Die Aufnahme-konfigurationen gruppieren sich in luftseitige Aufhängungen, bestehend aus einer Kameraaufhängung und in einer größeren Entfernung liegenden Trennfläche, und Unterwasseranordnungen, bestehend aus kompakten Unterwassergehäusen mit kurzer Distanz zur Trennfläche. Zur Auswertung der ebenen Aufnahme-konfigurationen wurde die Trennfläche parallel zur Sensorebene angenommen. Bis auf die von Menna et al. (2016) und Menna et al. (2017) eingesetzten Systeme treten bei einer angenommenen Abstandsänderung von  $\pm 25$  mm abstandsabhängige Verschiebungen um die drei Pixel auf. Dass die Systeme von Menna et al. (2016) und Menna et al. (2017) eine so geringe Abstandsänderung aufweisen, ist auf das vorteilhafte Verhältnis zwischen luft- und wasserseitigem Strahlweg zurückzuführen. Je kürzer der luftseitige und länger der wasserseitige Anteil des Strahlweges ausfällt, desto kleiner ist die Abstandsabhängigkeit. Der Öffnungswinkel eines Objektivs ist ein weiterer Faktor, der die Abstandsabhängigkeit beeinflusst. Für ebene Trennflächen gilt, je kleiner der Öffnungswinkel, desto geringer sind die abstandsabhängigen Verzeichnungen. Zur Erklärung, die radialsymmetrisch dominierten Verzeichnungen ebe-

## 4. Optik

ner Trennflächen wachsen mit dem Abstand von deren Zentrum. Ein kleinerer Öffnungswinkel fasst einen engeren Bildausschnitt, der näher am Zentrum liegt und so geringere radialsymmetrische Verzeichnungen aufweist. Bei hemisphärischen Trennflächen entscheidet die Art der Exzentrizität, inwieweit eine Verkleinerung des Bildausschnittes eine Reduktion der Verzeichnungen bewirkt. Die von einem konstanten Anteil dominierten tangentialen Verzeichnungen können unter Umständen dazu führen, dass die Verzeichnungen bei einer Verkleinerung des Bildausschnittes anwachsen. Der Grund hierfür ist, dass bei der Veränderung der Brennweite bzw. des Öffnungswinkels immer auch die Sensorlage anzupassen ist. Bleiben nun die beobachteten tangentialen Verzeichnungen in etwa gleich, kommt es in Folge der neuen Sensorlage zu einer veränderten wahrgenommenen Verzeichnung, die bei kleinerem Bildausschnitt größer ausfallen kann.

### 4.5.3. Verzeichnungsmuster hemisphärischer Trennflächen bei fehlender Zentrums-koinzidenz

Bei fehlender Zentrums-koinzidenz von Eintrittspupille und hemisphärischer Vorsatzlinse durchstoßen die Lichtstrahlen die Trennflächen nicht mehr lotrecht, sondern werden zweimal gebrochen. Durch die Annahme eines zentralperspektivischen Einmedien-Modells wird der gebrochene Strahlverlauf im Bildraum als Verzeichnung wahrgenommen, siehe Abbildung 4.7.

An dieser Stelle sei nochmals erwähnt, dass axiale Dezentrierungen radialsymmetrische Verzeichnungen und tangentiale Dezentrierungen radialasymmetrische Verzeichnungen hervorrufen (Luhmann, 2018). Nachdem das Brown-Conrady-Modell in der Lage ist sowohl radial-symmetrisch als auch radialasymmetrische Verzeichnungen zu modellieren, liegt der Schluss nahe, dass unter Vernachlässigung der Abstandsabhängigkeit das Brown-Conrady-Modell auch im Mehrmedienfall eingesetzt werden kann. Im Zuge von Vorversuchen fiel jedoch auf, dass die Parameter des Brown-Conrady-Modells bei einer Unterwasserkalibrierung mit hemisphärischer Vorsatzlinse sehr sensitiv auf jegliche Änderungen reagierten. Dies schlug sich auch in den resultierenden Verzeichnungsmustern nieder, die starken Schwankungen unterlagen und augenscheinlich keinen Trend erkennen ließen. Darüber hinaus waren die von der Software abgeschätzten Fehler vergleichsweise hoch.

Nach Kenntnisstand des Autors besteht bis dato keine detaillierte Analyse der Auswirkungen tangentialer und axialer Dezentrierungen bei hemisphärischen Linsen. Zum besseren Verständnis sind die Verzeichnungsmuster hemisphärischer Trennflächen für den Fall einer rein axialen und rein tangentialen Exzentrizität in Abbildung 4.9 dargestellt. Die axialen Exzentrizitäten reagieren mit radialsymmetrischen Verzeichnungen. Tangentiale Exzentrizitäten bewirken eine Bildhauptpunktverschiebung und rufen zudem tangential-asymmetrische Verzeichnungen hervor. Die tangentialen Exzentrizitäten teilen sich in etwa in drei Viertel Bildhaupt-

#### 4. Optik

Tabelle 4.2.: Abstandsabhängige Verzeichnung für verschiedene bereits publizierte Aufnahmekonfigurationen. Für eine bessere Vergleichbarkeit wurde von einem 1-Zoll-Sensor ausgegangen; Es wird zwischen ebenen (e) und hemisphärischen (h) Trennflächen unterschieden sowie zwischen luftseitigen Aufhängungen (lu) und vollständigen Unterwasser-Anordnungen (uw); Die Berechnung zur Variation der maximalen Verschiebungen beruht auf der Annahme, dass die Änderung der Objektentfernung  $\pm 25$  mm beträgt und geht von einer Pixelgröße von  $4,8 \mu\text{m}$  aus

	Brennweite in [mm]	Öffnungswinkel [°]	Trennflächen	Anordnung	Objektstand [m]	Wassertiefe [m]	Variation der maximalen Verschiebung in Pixel	Anmerkungen	Differenz [Pixel]
Butler et al. (2002)	80	8,6	e	lu	1,2	0,12	9,01-14,06		5,1
					1,2	0,25	23,67-28,12		4,5
					2,4	0,2	8,99-11,56		2,6
Godding et al. (2003)	24	28,7	e	lu	4,0	0,1	2,19-3,96	*)1	1,8
Eder et al. (2011) Rapp et al. (2012)	24	28,7	e	lu	2,5	0,15	6,15-9,15		3,0
Bertin et al. (2013)	20	35,5	e	lu	0,709	0,1	13,05-22,78		9,7
					0,739	0,2	33,21-40,74		7,5
Hsua und Wang (2013)	60	12,2	e	lu	1,0	0,3	35,43-40,18	*)1	4,8
Menna et al. (2016)	24	28,7	h	uw	1,0	0,925	45,30-45,48	*)2	0,18
							44,18-46,12	*)5	1,9
	35	20,7	1,0	0,925	50,67-50,88	*)2	0,21		
							49,38-51,62	*)5	2,2
Menna et al. (2017)	24	28,7	e	uw	1,6	1,55	107,12-107,27	*)3	0,15
							106,31-107,85	*)5	1,5
Detert et al. (2018)		96	e	lu	0,8	0,925	236,50-237,78	*)2	1,3
		*)6					227,89-242,01	*)5	14,1
Versuch	12,5	56	e	uw	0,275	0,245	94,09-98,00		3,9
			h	uw	0,275	0,2	7,76-8,19	*)4	0,4

Anmerkungen:

- \*)1 Objektstand und Wassertiefe sind geschätzt
- \*)2 Exzentrizitäten aus Paper ( $-0,4/-1/5,4$ ) mm
- \*)3 Annahme, dass die Eintrittspupille 5 cm vor der Trennfläche liegt.
- \*)4 isotrope Exzentrizität 0,5 mm
- \*)5 Der im Paper vorgestellte Anwendungsbereich überschreitet die  $\pm 25$  mm Annahme signifikant, deshalb wurde dieser auf  $\pm 250$  mm ausgedehnt.
- \*)6 Im Versuch kam ein  $185^\circ$ -Objektiv zum Einsatz. Gemäß der optischen Gesetzmäßigkeiten sind jedoch nur ca.  $96^\circ$  möglich (Menna et al., 2016).

## 4. Optik

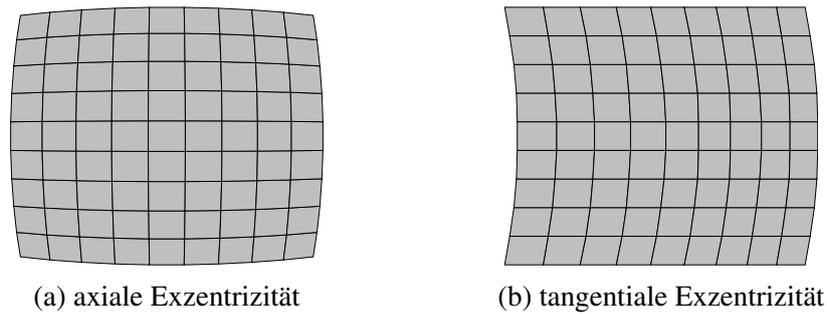


Abbildung 4.9.: Verzeichnungsmuster hemisphärischer Trennflächen bei rein axialer (links) und rein tangentialer Verzeichnung (rechts); Für die Darstellung der tangentialen Verzeichnung wurde der konstante Anteil, der im Brown-Conrady-Modell durch eine Hauptpunktverschiebung abgedeckt ist, abgespalten, so dass der rein tangential-asymmetrische Teil zur Geltung kommt.

punktverschiebung und ein viertel tangential-asymmetrische Verzeichnung auf. Für die Darstellung der tangentialen Verzeichnungen in Abbildung 4.9 wurden die konstanten Anteile, die die Bildhauptpunktverschiebung beschreiben, abgespalten. Die Charakteristik der so extrahierten tangentialen-asymmetrischen Verzeichnungen kann das Brown-Conrady-Modell nicht wiedergeben. Dadurch lassen sich auch die entstandenen Schwierigkeiten, die die Software bei der Verarbeitung der Unterwasseraufnahmen hatte, erklären.

Um die Auswirkungen von axialen  $ex_{ax}$  und tangentialen  $ex_{tan}$  Exzentrizitäten sichtbar zu machen wurde eine Aufnahmekonfiguration mit unterschiedlichen Exzentrizitäten, die zwischen 0,1 mm und 1 mm variierten, untersucht. Für jede Aufnahmekonfiguration wurden die mittlere  $dis_{av}$  und maximale  $dis_{max}$  Verzeichnung berechnet. Die Bildweite  $g = 275$  mm sowie die Trennflächenradien  $r_i = 73$  mm und  $r_a = 75$  mm wurden konstant gehalten. Aus der Ergebniszusammenstellung in Abbildung 4.10 wird die Dominanz der tangentialen Exzentrizitäten erkennbar.

### 4.6. Zwischenfazit

Es wurde gezeigt, dass für die praktischen Versuche an der Versuchsanstalt Oberrach der Brechungsindex des Wassers als homogen und isotrop angenommen werden kann. Um einen klar definierten optischen Zugang ins Wasser zu erhalten, der nicht durch Oberflächenwellen gestört ist, bedarf es einem Unterwassergehäuse. Dies kann mit ebenen, hemisphärischen oder Ivanoff-Rebikoff Vorsatzlinsen ausgestattet werden. Üblicherweise kommen heutzutage ebene oder hemisphärische Vorsatzlinsen zum Einsatz. Die Ivanoff-Rebikoff Vorsatzlinsen führen in der Unterwasserphotogrammetrie ein Nischendasein, was an ihrem komplexen Aufbau liegen dürfte.

#### 4. Optik

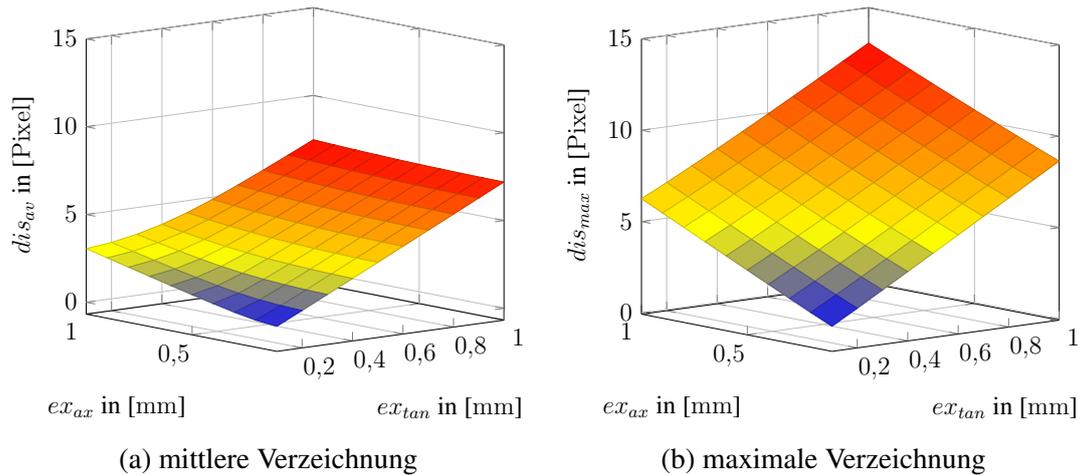


Abbildung 4.10.: Mittlere  $dis_{av}$  und maximale  $dis_{max}$  Verzeichnung für ein hemisphärisches Trennflächenszenario mit konstanter Bildweite  $g = 275$  mm und variierenden axialen  $ex_{ax}$  und tangentialen  $ex_{tan}$  Exzentrizitäten

Mit den Strahlwegsbeschreibungen für die ebenen und hemisphärischen Trennflächen, die für den Dreimedien-Fall aufgestellt wurden, konnten die Brennflächen und die Verzeichnungen der Vorsatzlinsen berechnet werden. Die Brennflächen besitzen einen informativen Charakter. Dagegen sind die Verzeichnungen von praktischer Relevanz, da sie im photogrammetrischen Rekonstruktionsprozess zu berücksichtigen sind. Die photogrammetrischen Verfahren basieren in aller Regel auf dem Brown-Conrady-Modell, das sich hervorragend zur Beschreibung von Objektivverzeichnungen im Einmedienfall eignet. Jedoch ist das Brown-Conrady-Modell bei einer Unterwasseranwendung überfordert. Zum einen durch die Abstandsabhängigkeit der Verzeichnung und zum anderen durch die nicht im Modell abbildbaren tangentialen Verzeichnungen, die beim Einsatz von hemisphärischen Linsen entstehen.

Im Auswahlprozess zwischen ebener und hemisphärischer Trennfläche wurden die Bildqualität, die praktische Umsetzbarkeit und die modelltheoretischen Hürden gegeneinander abgewogen. Die Umsetzbarkeit und Modellbildung würden für ein ebenes System sprechen, dabei würden sich die Implementierung der abstandskorrigierten Brechkorrektur in beiden Systemen nur marginal voneinander unterscheiden. Für ein hemisphärisches System spricht die höhere Bildqualität. Da die Erfassung der Sohltopographie auf Einzelkornebene nur mit hochwertigen Eingangsdaten gelingen kann, fiel die Entscheidung letztlich auf das hemisphärische System, dessen optische Parameter im nächsten Abschnitt erarbeitet werden.

## 4. Optik

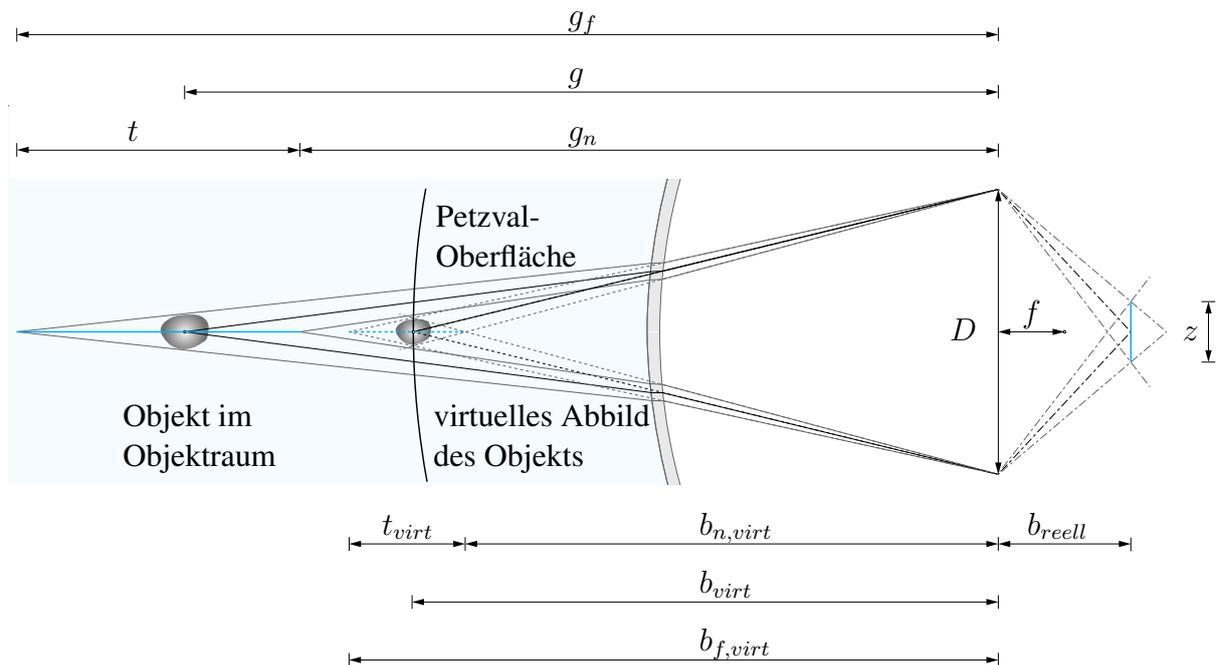


Abbildung 4.11.: Abbildung eines Objekts im Mehrmedienfall unter Verwendung einer hemisphärischen Trennfläche: die hemisphärische Trennfläche bildete ein Objekt mit einer Gegenstandsweite  $g$  auf ein virtuelles Bild mit der Bildweite  $b_{virt}$  ab, wobei dieses verkleinert wird; das Aufnahmesystem ist auf das virtuelle Bild fokussiert; die Schärfentiefe im virtuellen Raum  $t_{virt}$  ist durch den Durchmesser des Unschärfekreis  $z$  festgelegt; durch Rückprojektion lässt sich die Schärfentiefe des virtuellen Raums  $t_{virt}$  in den Objektraum  $t$  übertragen;  $f$  ist die Brennweite des Objektivs

### 4.7. Fokus, Blende und Schärfentiefe

Im nachfolgenden Abschnitt werden die ObjektivEinstellung, Fokus und Blende, die im Zusammenspiel mit einer hemisphärischen Vorsatzlinse vorzunehmen sind, erläutert. Zudem wird die aus den Einstellungen resultierende Schärfentiefe berechnet.

Hemisphärische Trennflächen agieren als negative Vorsatzlinsen, wodurch virtuelle Bilder entstehen, die näher an der Kamera erscheinen und auf einer Kugelfläche, der sogenannten Petzval-Oberfläche, zu liegen kommen (Luhmann, 2018), siehe Abbildung 4.11. Zur korrekten Scharfstellung ist das Objektiv auf die Entfernung des virtuellen Bildes  $b_{virt}$  zu fokussieren.

Zur Lagebestimmung des virtuellen Bildes kommt, wie auch schon bei Menna et al. (2016), *WinLens3D Basic* zum Einsatz. Die hemisphärische Vorsatzlinse wurde in diesem Programm mit den Trennflächenradien  $r_i = 73$  mm,  $r_a = 75$  mm sowie dem Brechungsindex  $n_g = 1,5168$  modelliert. Aus Vorversuchen ergaben sich Gegenstandsweiten  $g$  zwischen 175 mm und maximal 475 mm. Die korrespondierenden virtuellen Bildweiten  $b_{virt}$  sind in Tabelle 4.3 angegeben.

## 4. Optik

Dabei ist zu erkennen, dass die hemisphärische Vorsatzlinse den kompletten Objektraum in einen extrem stark komprimierten virtuellen Bildraum abbildet. Die maximale Entfernung des virtuellen Bildes lässt sich nach Knight (2015) zu  $b_{virt,max} = 4r_a$  abschätzen. Bei der Wahl der Kameraoptik ist demnach auf den Nahbereich des Fokus bzw. minimalen Arbeitsabstand zu achten. Ein zu großer Nahbereich eines Objektivs lässt sich durch Distanzelemente verkleinern (Menna et al., 2016), wodurch die Brennweite allerdings mit verändert wird. Zur Realisierung der Messungen standen im Rahmen dieser Arbeit Basler TS1214-MP Objektive zur Verfügung. Diese sind mit einer Brennweite von  $f = 12,5$  mm, einem maximalen Bildkreis von 1-Zoll und einem minimalen Arbeitsabstand von 100 mm ausgestattet. Aufgrund des sehr geringen, minimal möglichen Arbeitsabstandes konnte auf Distanzelemente verzichtet werden.

Zur Scharfstellung der Kameraoptik ist auf die virtuelle Bildweite  $b_{virt}$  zu fokussieren, um das virtuelle Bild scharf auf dem Sensor abzubilden, siehe Abbildung 4.11. Objektpunkte die vor oder hinter der fokussierten virtuellen Bildweite liegen werden mit wachsendem Abstand zunehmend unschärfer abgebildet. Vom Mensch als scharf wahrgenommen werden Abbildungen deren Zerstreuungskreisdurchmesser  $z$  unter der Auflösungsgrenze des menschlichen Auges liegen (Luhmann, 2018). Die Auflösungsgrenze des menschlichen Auges beträgt im Mittel etwa eine Bogenminute (Nasse, 2010). Bei der Betrachtung eines Bildes gilt,  $1/3000$  der Bilddiagonale unter einem Schwinkel von einer Bogenminute als strengste sinnvolle Forderung und bis  $1/1500$  als noch akzeptabel (Nasse, 2010). In der Digitalphotographie wird der Unschärfekreisdurchmesser anhand der Pixelgröße festgelegt. Jähne (2012) empfiehlt den Unschärfekreisdurchmesser auf einen Pixel zu begrenzen, wohingegen Luhmann (2018) einen Bereich von ein bis drei Pixel angibt. In den folgenden Berechnungen wird die strengere Empfehlung von nur einem Pixel angesetzt. Die reale Pixelgröße des verwendeten Bildsensors beträgt  $4,8 \mu\text{m}$ .

Blenden begrenzen das Strahlenbündel und regeln so Lichtmenge und Tiefenschärfe (Winnik und Schulz, 2012, Luhmann, 2018). Dabei ist der Quotient aus bildseitiger Brennweite  $f$  und Durchmesser der Eintrittspupille  $d$  als Blendenzahl  $k$  definiert (Luhmann, 2018).

$$k = \frac{f}{d} \quad (4.23)$$

Die Tiefenschärfe eines Objektivs wächst mit größer werdender Blendenzahl  $k$ , wobei das Auflösungsvermögen gleichzeitig sinkt. Das Auflösungsvermögen, definiert als Abstand zwischen zwei Beugungsscheibchen  $r'$ , sollte ein Pixel nicht überschreiten. Strenggenommen ist die Beugung abhängig von der Wellenlänge, einfachheitshalber kann jedoch eine mittlere Wellenlänge von  $\lambda = 550$  nm angesetzt werden (vgl. Luhmann, 2018). Die durch das Auflösungsvermögen beschränkte größte mögliche Blendenzahl ergibt sich so zu:

$$k = \frac{r'}{1.22 \cdot \lambda} = \frac{4.8 \mu\text{m}}{1.22 \cdot \lambda} \approx 7.1 \quad (4.24)$$

#### 4. Optik

Mit Kenntnis des tolerierbaren Unschärfekreisdurchmessers  $z$ , der Objektivbrennweite  $f$ , der virtuellen Bildweite  $b_{virt}$  und des Blendendurchmessers  $D$ , der sich aus der Blendenzahl ableiten lässt, sind der virtuelle Bildnahpunkt  $b_{n,virt}$  und virtuelle Bildfernpunkt  $b_{f,virt}$  berechenbar, siehe Formeln 4.25. Die Formeln für die virtuelle Bildfernweite  $b_{f,virt}$  und virtuelle Bildnahweite  $b_{n,virt}$  sind aus dem Strahlensatz und den Linsengleichungen abgeleitet (Winnik und Schulz, 2012). Die in Winnik und Schulz (2012) und Luhmann (2018) angegebenen Bezüge für Bildfern- und Bildnahpunkte gelten für ein positives Linsensystem. Zur Anpassung an die negative wirkende Vorsatzlinse ist die Gegenstandsweite durch die virtuelle Bildweite ersetzt worden.

$$b_{n,virt} = \frac{b_{virt}f^2}{f^2 + z\frac{f}{D}(b_{virt} - f)} \quad b_{f,virt} = \frac{b_{virt}f^2}{f^2 - z\frac{f}{D}(b_{virt} - f)} \quad (4.25)$$

Als Schärfentiefe ist der Abstand zwischen Bildnah- und Bildfernpunkt bezeichnet (Luhmann, 2018). Als Besonderheit zeigen hemisphärische Vorsatzlinsen den virtuellen Schärfentiefebereich  $t_{virt}$  sowie den realen Schärfentiefebereich  $t$ . Die Schärfentiefe im virtuellen Bildraum  $t_{virt}$  ist als Differenz der virtuellen Bildweiten definiert, die ihrerseits wiederum durch den Zerstreuungskreisdurchmesser bestimmt sind, siehe Gleichung 4.26).

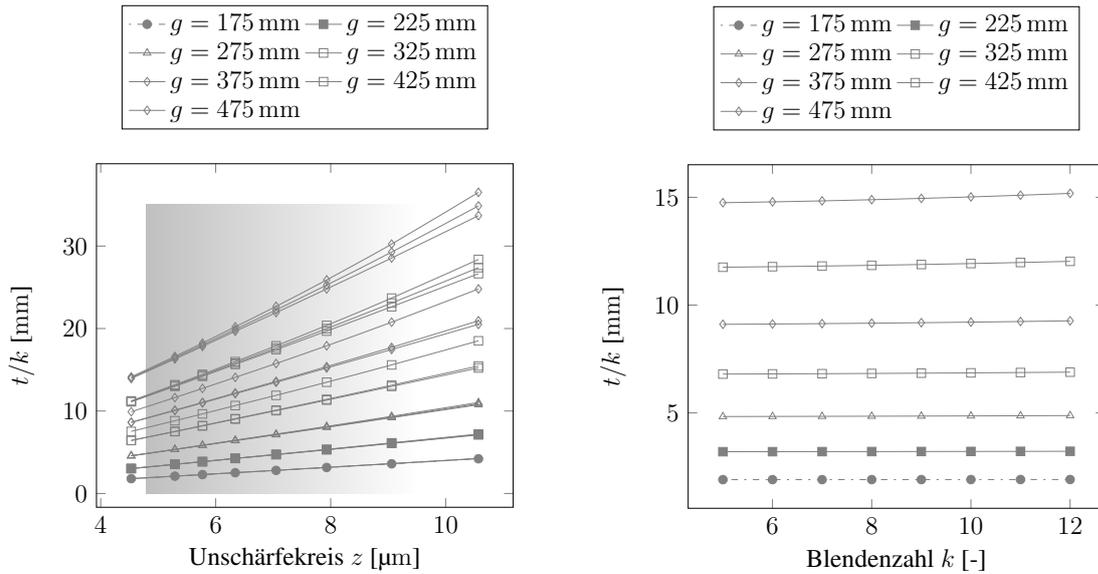
$$t_{virt} = b_{f,virt} - b_{n,virt} \quad (4.26)$$

Die Schärfentiefe im Objektraum  $t$  ist durch Rückprojektion der virtuellen Bildnah-  $b_{n,virt}$  und Bildfernpunkte  $b_{f,virt}$  festgelegt. In Tabelle 4.3 sind alle Kenngrößen für die im wasserbaulichen Versuchswesen üblichen Gegenstandsweiten zusammengetragen. Aus der Zunahme des Verhältnisses  $t/t_{virt}$  bei größer werdender Gegenstandsweite wird die stark wachsende Komprimierung des Bildraums ersichtlich.

Tabelle 4.3.: Übersicht über den Schärfentiefebereich bei unterschiedlichen Gegenstandsweiten  $g$ ; Grundlage der Berechnung sind die Annahmen  $f = 12,5$  mm, Blendenzahl = 7,1 und Unsicherheitsradius 1 Pixel = 4,8  $\mu$ m

$g$	[mm]	175	225	275	325	375	425	475
$b_{virt}$	[mm]	129,4	147,6	162,2	174,0	183,9	192,2	199,4
$b_{n,virt}$	[mm]	126,2	143,4	157,1	168,1	177,3	185,0	191,6
$b_{f,virt}$	[mm]	132,8	152,1	167,7	180,4	191,0	200,1	207,9
$g_n$	[mm]	167,4	212,4	256,4	298,8	340,6	381,2	420,9
$g_f$	[mm]	183,5	239,3	297,2	356,3	417,1	480,5	545,9
$t_{virt}$	[mm]	6,60	8,7	10,6	12,3	13,8	15,1	16,3
$t$	[mm]	16,1	27,0	40,8	57,4	76,4	99,4	125,1
$t/t_{virt}$	-	2,4	3,1	3,8	4,7	5,6	6,6	7,7

## 4. Optik



(a) Der Einfluss des Unschärfekreisdurchmessers bei verschiedenen Gegenstandsweiten  $g$  und Blendenzahlen  $k$  im Einmedien-Fall (b) Der Einfluss der Blendenzahl bei  $z = 4,8 \mu\text{m}$  und unterschiedlichen Gegenstandsweiten  $g$  im Einmedien-Fall

Abbildung 4.12.: Verhalten des Verhältnisses Schärfentiefe  $t$  zu Blendenzahl  $k$

Abschließend wird in diesem Abschnitt der Einfluss des gewählten Unschärfekreisdurchmessers  $z$  auf die Schärfentiefe kurz diskutiert. Mit der Festlegung des Unschärfekreisdurchmessers auf nur einen Pixel wurde der strengsten Empfehlung entsprochen. Es ist durchaus legitim einen größeren Unschärfekreisdurchmesser zuzulassen, wodurch die Schärfentiefe zunimmt. In Abbildung 4.12a ist das Verhältnis von Schärfentiefe zu Blendenzahl  $t/k$  für unterschiedliche Unschärfekreisdurchmesser und Gegenstandsweiten zusammengestellt. Die Auffächerungen, die bei den größeren Gegenstandsweiten ersichtlich werden, sind den unterschiedlichen Blendenzahlen geschuldet. In Abbildung 4.12b ist der Einfluss der Blendenzahl auf das Verhältnis  $t/k$  für  $z = 0,48 \mu\text{m}$  dargestellt. Daraus wird erkennbar, dass die Blendenzahl erst mit zunehmender Gegenstandsweite geringfügig zum Verhältnis  $t/k$  beiträgt.

### 4.8. Zusammenfassung

Nach der im Zwischenfazit getroffenen Festlegung, den optischen Zugang über hemisphärische Vorsatzlinsen zu realisieren, siehe Abschnitt 4.6, befasste sich der zurückliegende Abschnitt mit den konkreten Einstellungen des Aufbaus hinsichtlich der Einstellung des Fokus, der Blende und der Schärfentiefe. Die hemisphärischen Vorsatzlinsen wirken als negative optische Elemente, so dass objektraumseitig virtuelle Bilder entstehen. Die Objektive sind daher auf die virtuelle Bildweite zu fokussieren. Zudem bilden sie den Objektraum in einem stark kompri-

#### *4. Optik*

mierten virtuellen Bildraum ab und vergrößern so die Schärfentiefe. Die Festlegung der Blende erfolgte in Abstimmung mit dem eingesetzten Kamerasensor und dessen Pixelgröße.

Mit diesen Vorarbeiten konnte die Realisierung des Vorhaben, die Sohle auf Einzelkornebene zu erfassen, starten. Nachfolgend werden der Versuchsaufbau, die Unterwasserrekonstruktion und erste Ergebnisdaten detailliert beschrieben.

## 5. Versuch

Nachdem in den beiden vorangegangenen Kapiteln die photogrammetrischen und optischen Grundlagen geschaffen wurden, kann nun mit der praktischen Umsetzung begonnen werden. Nachfolgend sind der Aufbau des Versuchsstandes inklusive aller notwendigen Anbauteile, das Vorgehen zur Unterwasserrekonstruktion und die daraus resultierenden Ergebnisdaten vorgestellt.

### 5.1. Aufbau

#### 5.1.1. Versuchsstand

Die im Rahmen dieser Arbeit beschriebenen praktischen Versuche erfolgten an der Versuchsanstalt Obernach der Technischen Universität München. Das verwendete Gerinne misst eine Gesamtlänge von 3,0 m, eine Breite von 0,6 m und eine Tiefe von 1,0 m und wird über das Einlaufbecken gespeist. Das mit verschiedenen Kammern ausgestattete Einlaufbecken ist durch zwei Rohrleitungen direkt an den Hochbehälter der Versuchshalle angebunden. Beide Rohrleitungen sind mit einem magnetisch induktiven Durchflussmesser und elektrischen Schieber ausgestattet. Letztere sind über einen Schaltschrank manuell zu bedienen. Gemeinsam können die beiden Anschlüsse den Versuchsstand mit bis zu  $220 \text{ l s}^{-1}$  beschicken, wovon in den Versuchen nur rund 15 % genutzt wurden. Der Versuchsstand ist als interaktives 3D-Objekt in Abbildung 5.1 in das Dokument eingebettet.

In der letzten Kammer des Einlaufbeckens, bevor das Wasser ins Gerinne einströmt, fließt das Wasser über ein Streichwehr, das komplexe räumliche Strömungsstrukturen und beachtliche Lufteinträge hervorruft. Zwischen dem Einlaufbecken und der Rinne wurden zur Strömungsgleichrichtung zusätzlich zu den üblichen Tonröhren Filtermatten aus der Aquaristik installiert. Diese als poröses Medium wirkenden Filtermatten bedingen einen leichten Aufstau, erzielen aber eine Vergleichmäßigung, die mit Lochblechen oder Ähnlichem nicht zu erreichen waren. Zudem erwiesen sich die Filtermatten aufgrund ihrer großen Oberfläche als gute Luftblasen-Entferner. Die komplexe Zuströmung aus dem Einlaufbecken und die extreme Kompaktheit des Gerinnes führten dazu, dass die Einlaufeffekte trotz der getroffenen Gegenmaßnahmen bis in

## 5. Versuch

den Messbereich hineinreichten. Der Strömung fehlte es an Raum und Zeit, die für die Entwicklung einer gleichmäßigen Strömung erforderlich gewesen wären. Den praktischen Funktionstests des Messverfahrens und dessen Demonstration schadet die Zuströmsituation, abgesehen vom leicht erhöhten Lufteintrag, wenig. Hinsichtlich einer Verwertung der gewonnenen Daten, um daraus beispielsweise neue Modelle abzuleiten, ist die komplexe Zuströmung weniger zuträglich, da sie die bettbildenden Prozesse zu sehr beeinflusst. Um sinnvoll eine Übertragung vom Modellmaßstab in den Naturmaßstab vornehmen zu können, wäre ein deutlich längeres und nach Möglichkeit auch breiteres Gerinne erforderlich gewesen.

Der Versuchsstand wurde mit unterschiedlichen Einbauten betrieben, die darauf ausgelegt waren, eine lokale Sohlveränderungen hervorzurufen. Im Rahmen der stattgefundenen Versuche wurden drei Einbauten getestet: ein elliptischer Pfeiler mit  $a = 32,5$  mm und  $b = 16,25$  mm, der quer zur Strömung ausgerichtet war, ein kreisförmiger Pfeiler mit  $r = 32,5$  mm und eine angeschrägte Einengung in Form eines gleichschenkligen Trapezes mit einer Basislänge von 400 mm, einer Kopflänge von 100 mm und einer Höhe von 100 mm. Für alle drei Einbauten wurden 12-stündige Versuche mit Einkorn- und Mehrkornmaterial gefahren. Nach einer ersten Sichtung des Bildmaterials wurde deutlich, dass zur Demonstration des Messverfahrens und Auswertevorgehens die Versuche mit dem elliptischen Pfeiler sich am besten eignen, da bei diesen Versuchen die größten morphologischen Änderungen auftraten. Aus den Aufzeichnungen der anderen Versuche konnte kein Mehrwert erkannt werden, deshalb wurden Sie nicht ausgewertet.

Für die Versuche wurde in das Gerinne ein 2,5 m langer Fehlboden eingebaut, der ungefähr mittig auf einer Strecke von 0,8 m um zehn Zentimeter abgesenkt war. In diesem waren die zu untersuchenden Bauwerkstrukturen eingebaut. Die eben eingebrachte Sedimentauflage betrug fünf und im abgesenkten Bereich fünfzehn Zentimeter. So konnte den sich entwickelnden Erosionsstrukturen ausreichend Tiefgang zugestanden werden. Der Abfluss wurde stets so gewählt, dass die Fließgeschwindigkeiten im ungestörten Bereich unterhalb des kritischen Wertes für den Bewegungsbeginn des Sediments lagen. Die Sohlbewegungen traten damit ausschließlich nahe der eingebrachten Bauwerksstruktur auf. Für die Versuche mit Einkornmaterial lagen die Abflüsse zwischen  $28$  und  $30 \text{ l s}^{-1}$  und die Wasserstände bei ca. 25 cm. Für die Versuche mit Mehrkornmaterial lagen die Abflüsse zwischen  $29$  und  $31 \text{ l s}^{-1}$  und die Wasserstände bei ca. 26 cm. Bevor das Wasser über das feste Wehr wieder zurück in den Wasserkeller floss, passierte es einen Sandfang, der den Sedimentaustrag unterband. Mit seiner Ausstattung eignete sich der Versuchsstand nur zur Untersuchung von stationären Zuständen. Zur Untersuchung von instationären Versuchen müsste dieser erst mit einer Steuerung versehen werden.

Um den Versuchsstand nach Abschluss der Versuchsreihe vollständig entwässern zu können, wurde der Fehlboden inklusive seiner Eintiefung mit Drainagebohrungen versehen, die ein kontrolliertes und zügiges Trockenlegen ermöglichten.

## 5. Versuch

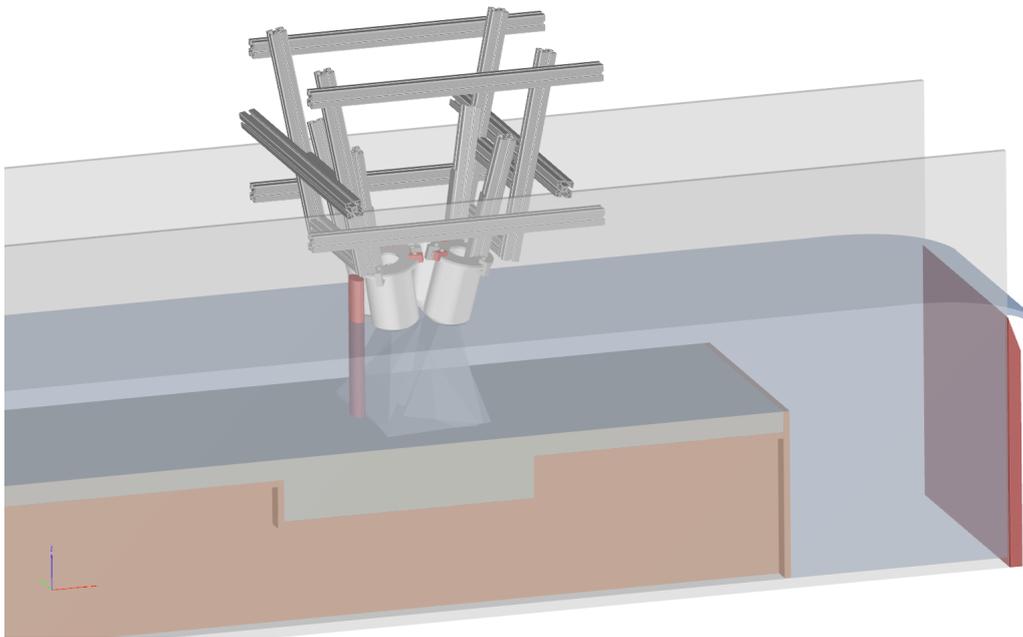


Abbildung 5.1.: Interaktives 3D-Modell des Versuchszustandes

### 5.1.2. Sediment

Bei der Auswahl des beweglichen Sohlmaterials stand die Texturvielfalt im Vordergrund. Das eingesetzte SfM-Messverfahren bedarf zur Identifikation von Bildmerkmalspunkten heterogener texturierter Oberflächen. Des Weiteren sollte das Sediment frei von Schwebstoffen sein, die das Wasser eintrüben und so den optischen Zugang erschweren würden. Die Wahl fiel auf werkseitig gewaschenen Quarzsand, der in unterschiedlichen Sortierungen vorrätig war. In den Versuchen wurden zwei unterschiedliche Sohlsubstratzusammensetzungen verwendet. Zu Beginn wurde in den Experimenten Einkornmaterial eingesetzt. Das sehr eng gestufte Material lässt so gut wie keine Sortierprozesse erkennen, so dass der Fokus auf die exakte Erfassung der Sohltopografie gerichtet war.

Nachdem die Sohlfassung bis auf Einzelkornebene erfolgreich implementiert werden konnte, wurden zum Schluss hin auch noch einige Versuche mit einer Mehrkornmischung gefahren, um herauszufinden, ob Sortierprozesse sichtbar gemacht werden können. Das Mischungsverhältnis der Mehrkornsohle wurde dabei völlig frei gewählt. Die charakteristischen Korndurchmesser beider Sohlsubstratzusammensetzungen sind in Tabelle 5.1 angegeben. Aus bodenmechanischer Sicht sind die beiden eingesetzten Sohlmischungen sehr ähnlich und mit einer Unförmigkeitszahl  $C_u < 5$  den gleichförmigen Böden zuzuordnen.

## 5. Versuch

Tabelle 5.1.: Kennwerte der Sohlsubstratzusammensetzungen, Korngrößendurchmesser verschiedener Kornklassen  $d_m$ ,  $d_{90}$ ,  $d_{16}$ ,  $d_{84}$  und Unförmigkeitszahl  $C_U = d_{60}/d_{10}$

	$d_m$	$d_{90}$	$d_{16}$	$d_{84}$	$C_U$
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]
Einkornmischung	1,5	1,9	1,1	1,8	1,5
Mehrkornmischung	1,6	2,2	1,1	2,1	1,6

### 5.1.3. Kamera und Objektiv

Für die Aufnahmen standen vier Industriekameras vom Typ *UI-3180CP* aus dem Hause *IDS (Imaging Development Systems)* zur Verfügung. Die Auflösung der mit monochromen, ein Zoll großen CMOS-Bildsensoren ausgestatteten Industriekameras beträgt 2592 x 2048 Pixel bei einer Pixelgröße von 4,80  $\mu\text{m}$ . Die Datenkommunikation erfolgt über eine USB3.0-Schnittstelle, deren maximale Datenrate eine mögliche Bildrate von 73 Bildern pro Sekunde gestattet. Zudem verfügen die Kameras über Hardwareeingänge zur Steuerung des Blitzes und der Auslösung, die für die externe Synchronisation genutzt wurden. Die externe Synchronisation erfolgt über externen Hardware-Taktgeber. Die Kameras sind in der Lage, Bilder mit einer Farbtiefe von 10 bit zur Verfügung zu stellen. In den Versuchen wurden jedoch nur 8 bit genutzt, da einige Algorithmen nicht in der Lage waren, die 10 bit Informationen zu verarbeiten. Eine Überarbeitung der Algorithmen konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht geleistet werden, da Eingriffe auf tiefster Programmierenebene erforderlich gewesen wären. Für die softwareseitige Einbindung der Kameras stehen herstellereigene Programmbibliotheken für alle gängigen Plattformen bereit. Diese regeln sowohl die Datenübertragung als auch die Kameraparametrierung (IDS, 2020, vgl.).

CMOS-Kameras (Complementary-Metal-Oxide-Semiconductor) zeichnen sich dadurch aus, dass das Licht jedes Pixels durch eigene Photodioden oder eigene Transistorelemente gewandelt wird (Luhmann, 2018). Bei der digitalen Bildaufnahme gibt der Sensor eine Spannung proportional zu der eingefallenen Lichtmenge aus, die über die voreingestellte Belichtungszeit eingefangen wurde (IDS, 2020). Der bei den Kameras verbaute elektronische Verschluss arbeitet nach dem Global Shutter-Prinzip. Dies bedeutet, dass der Belichtungsvorgang für alle Elemente synchron startet. Diese Art des Verschlusses ist gerade bei dynamischen Szenen vorteilhaft (Luhmann, 2018). Alternativ hätten die Kameras auch mit Farbsensoren, die nach dem Bayer-Prinzip arbeiten, beschafft werden können. Nach Einschätzung eines IDS-Fachmann hätte dies jedoch keine Vorteile gebracht. Nach dem Bayer-Prinzip arbeitende Bildsensoren nutzen einen Pixel-Viererverbund, bestehend aus zwei Pixeln mit grüner und jeweils einem Pixel mit einer roten und blauen Filterlinse. Nach der Bayer-Konvertierung liegt für jeden Pixel ein interpolierter RGB-Wert vor. Die Farbgewinnung geht zu Lasten der nativen Auflösung.

## 5. Versuch

Aufwärmeeffekte sind beim Betrieb von Kamerasystemen mit in Betracht zu ziehen. In der Aufwärmphase kommt es zu wärmebedingten Ausdehnungen der verbauten Materialien, die kleinste Längenänderungen verursachen, und einer Erwärmung der Kameraelektronik, die ebenfalls kleinste Änderungen bedingt. Je nach Aufbau und Umgebungssituation pendeln sich diese binnen einer halben Stunde auf einem stabilen Niveau ein (vgl. Luhmann, 2018). Um bei einer späteren Messung den Einfluss der Betriebstemperatur möglichst klein zu halten, wurde bei der Kalibrierung und den Zeitreihenaufnahmen auf eine ausreichende Aufwärmphase geachtet.

Die vier Industriekameras wurden mit Basler *TS1214-MP* C-Mount 1-Zoll-Objektiven bestückt. Sie sind mit einer Brennweite von  $f = 12,5$  mm und einem minimalen Arbeitsabstand von  $g = 100$  mm ausgestattet. Der Fokus und die Blende wurden manuell eingestellt und durch zwei kleine Arretierungsschraubchen gesichert. Zur Scharfstellung waren die Objektive vor dem Einbau ins Unterwassergehäuse auf die virtuelle Bildweite  $b_{virt}$  zu fokussieren, die für die gewünschte Messentfernung  $g$  theoretisch errechnet wurde, siehe Abschnitt 4.7. Die Messentfernung wurde mit 275 mm festgelegt, was einer virtuellen Bildweite von 162 mm entsprach. Die so in den Versuchsstand eingebrachten Kamera-Objektiv-Einheiten lieferten nur mäßig scharfes Bildmaterial. Eine eingehende Überprüfung der Objektive ergab, dass die auf den Objektiven aufgebrachten Skalen zur Fokuseinstellung verschoben waren. Dies führte gerade im Nahbereich zu starken Einbußen in der Schärfe. Zur Korrektur wurden die Objektive mit neuen Skalen versehen und lieferten sodann gestochen scharfe Bilder.

### 5.1.4. Aufnahmeeinheit

Oberflächenwellen im Nahbereich von Bauwerksstrukturen verzerren direkt durch die Wasseroberfläche aufgenommenen Unterwasserbilder beträchtlich. Eine Weiterverarbeitung solcher Aufnahmen zu qualitativ hochwertigen Modellen gestaltet sich äußerst schwierig, da für eine Korrektur die exakte Topographie der Wasseroberfläche bekannt sein müsste. Ein messtechnisches Verfahren, das berührungslos ohne Markerzugaben die Wasseroberfläche hochaufgelöst vermisst, existiert bislang noch nicht. Abhilfe schafft der Einsatz zusätzlicher Trennflächen, die einen klaren Phasenübergang definieren und die spätere Auswertung erleichtern.

Der Entscheid hemisphärische Trennflächen einzusetzen, erforderte den Bau von eigens entworfenen Aufnahmeeinheiten, da für die Industriekameras keine maßgeschneiderten Unterwassergehäuse angeboten werden. Auch die Abänderung bestehender Unterwassergehäuse erschien wenig gewinnbringend, da der Aufwand des Umbaus einem Neubau gleichkommt und der Anschaffungspreis pro Gehäuse bei mehreren hundert Euro gelegen hätte.

Die Aufnahmeeinheit trägt eine Kamera-Objektiv-Einheit und eine hemisphärische Vorsatzlinse, zur Illustration siehe Abbildung 5.2. Die Aufnahmeeinheit taucht nur minimal ins Wasser

## 5. Versuch

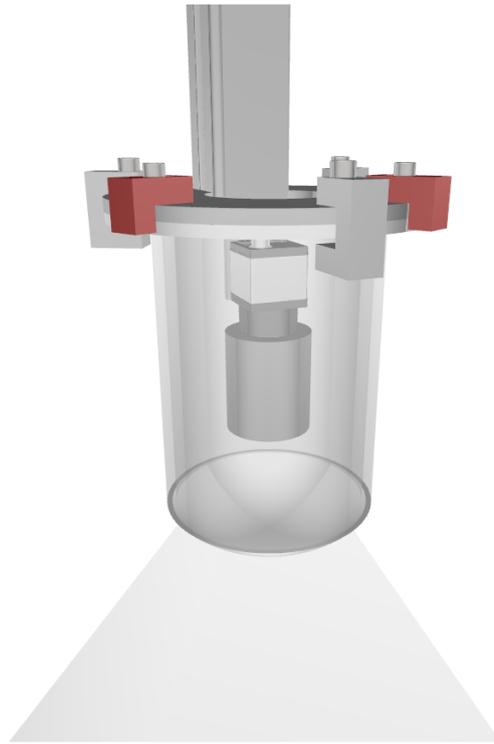


Abbildung 5.2.: Interaktives 3D-Modell einer Aufnahmeinheit

ein, gerade so viel, dass der aufzunehmende Bildausschnitt vollständig unter Wasser erscheint, wodurch die Strömung nur geringfügig gestört wird.

Die hemisphärische Vorsatzlinse wurde auf einen Zylinder aufgeklebt und mit einem Flansch versehen. An der Kameraaufhängung, die ebenfalls mit einem Flansch ausgestattet war, konnte die Vorsatzlinsenkonstruktion mit Hilfe von Mini-Klemmen befestigt werden. Bereits beim Entwurf der Aufnahmeeinheiten wurden die Möglichkeit zur Zentrumsausrichtung von Objektiv und Vorsatzlinse sowie die mechanische Stabilität bedacht. Die ausgeführte Variante erlaubt die axiale Verschiebung der Kamera-Objektiv-Einheit und tangentielle Verschiebung der Vorsatzlinsenkonstruktion, wodurch alle Exzentrizitäten ausgeglichen werden können. Zudem ist sie äußerst stabil ausgeführt. Die Abmessungen des Entwurfs, insbesondere der Vorsatzlinsenkonstruktion, könnten in einer optimierten Variante weiter verkleinert werden, so dass die Größe der ins Wasser eintauchenden Struktur sich weiter reduzieren würde.

Im ersten etwas länger dauerndem Versuch, der über mehrere Stunden ohne Unterbrechung lief, konnte das Anwachsen von kleinen auf den Vorsatzlinsen anheftenden Luftblasen beobachtet werden. Aus winzigen Keimzellen erwachsen über die Versuchsdauer hinweg immer größer werdende Luftblasen, gespeist von in der Strömung mittransportierten Mikro-Luftblasen. Eine Ablösung der angehefteten Luftblasen konnte nicht festgestellt werden. Die einzelnen kleinen Luftbläschen wirkten ihrerseits als optische Mini-Linsen, die unkalkulierbare Verzeichnungser-

## 5. Versuch

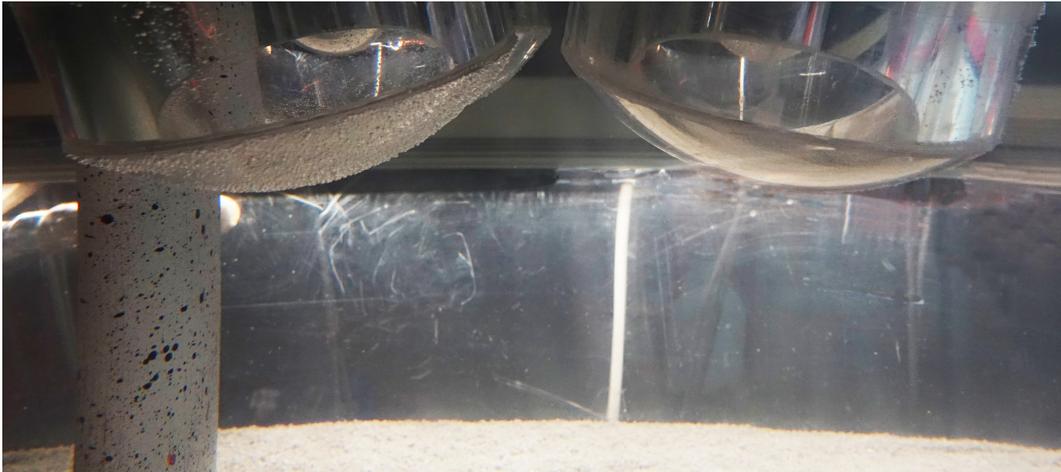


Abbildung 5.3.: Anheftung von Luftblasen auf den Vorsatzlinsen, linke Kuppel ohne Beschichtung, rechte Kuppel mit Akrylsäure behandelte Vorsatzlinse

scheinungen verursachten und die Bildqualität minderten. Umso erstaunlicher war es, dass das SfM-Verfahren trotz der stark geminderten Bildqualität noch in der Lage war, eine Rekonstruktion vorzunehmen. Ihren Ursprung nahmen die Mikro-Luftbläschen vor allem im Zulaufsystem, dort floss das Wasser über mehrere Überfälle, begleitet von einem steten Lufteintrag. Um den Lufteintrag im Zulauf möglichst klein zu halten, wurden die Überfallhöhen auf ein Minimum reduziert. Ergänzend wurde die Zulaufstrecke mit Filtern ausgestattet, die aufgrund ihrer großen Oberfläche die Zahl der Mikro-Luftblasen spürbar senkten. Darüber hinaus wurden mit hydrophilen Oberflächen-Beschichtungen experimentiert. Hydrophile Beschichtungen verringern den Kontaktwinkel zwischen Wasser und Oberfläche, wodurch die Luftblasen schwerer anheften bzw. ab einer gewissen Größe ablösen sollen. Die Applikation eines einfachen Sprays zeigte nur zu Beginn des Versuchs Wirkung und schien relativ bald von den Vorsatzlinsen abgewaschen zu sein. Zwei Vorsatzlinsen wurden vom Laborleiter der Firma *Adelhelm Kunststoffbeschichtungen* zu Versuchszwecken mit Akrylsäure behandelt, die durch ein hochfrequentes Niederdruckplasma polymerisiert wurde. So entstand eine dauerhafte und wirkungsvoll hydrophile Oberfläche, siehe Abbildung 5.3. Einzige Wermutstropfen waren die bei der Plasmabehandlung entstandenen Eintrübungen und Einbrennpunkte, vor allem letztere waren deutlich in den Bildern zu erkennen. Die Einbrennpunkte waren der hochfrequenten Niederdruck-Plasmabehandlung geschuldet, die einen geringen Arbeitsabstand erforderte. Durch eine schonendere niederfrequente Plasmabehandlung könnten der Arbeitsabstand vergrößert und Einbrennpunkte vermieden werden. Die Eintrübung sollten sich beim Einsatz des schonenderen Verfahren und mehr Sorgfalt bei der Aufbringung ebenfalls reduzieren. Für die finalen Aufnahmen wurden die Linsen nochmals lokal aufpoliert, was die Oberflächen-Beschichtung an diesen Stellen zerstörte. In den späteren Versuchsreihen mussten die Kuppeln in regelmäßigen Intervallen, in etwa alle zwei bis vier Stunden, durch vorsichtiges Abwischen von den Luftblasen befreit werden.

## 5. Versuch

Zur Aufnahme einer Messreihe wurden alle vier Aufnahmeeinheiten an einem massiven Gestell befestigt, das die Kamera- und Vorsatzlinsenpositionen über die Versuchsdauer hinweg sicherte. Die Aufnahmeeinheiten des Mehrkameraverbundes waren auf einen gemeinsamen Messbereich hin ausgerichtet, so dass der Messbereich von vier Kameras gleichzeitig eingesehen wurde. Die Festlegung der Messentfernung von Eintrittspupille bis zur Sohloberfläche auf 275 mm resultierte unter anderem aus den Ansprüchen, die Aufnahmeeinheiten nicht zu stark zu verkippen und im stereometrischen Verbund eine größtmögliche Überdeckung herzustellen. Eingeschränkt durch den baulich begrenzten Mindestabstand der Aufnahmeeinheiten führte dies zu den 275 mm. Zur Untersuchung kleinerer Fließtiefen müssten die Ansprüche reduziert oder besser noch, der bauliche Mindestabstand verringert werden. In der gewählten Konfiguration wurde die Sohle in etwa mit 0,1 mm pro Pixel aufgelöst.

### 5.1.5. Beleuchtung

Die Gleichmäßigkeit der Ausleuchtung nimmt erheblichen Einfluss auf die Bildqualität. Die Herausforderung ist, möglichst viel Licht in den Beobachtungsraum zu bekommen, ohne dass störende Reflexionen, Spiegelungen oder Schattenbildungen auftreten. Über der Wasseroberfläche angeordnete Beleuchtungselemente führten dazu, dass die Wellenmuster in Form von Intensitätsschwankungen auf der Sohloberfläche sichtbar wurden. In den hemisphärischen Vorsatzlinsen angeordnete Beleuchtungselemente bedingten Reflexionen, die das Bild stellenweise überbelichteten und damit unbrauchbar machten. Die höchste Gleichmäßigkeit konnte mit seitlich angeordneten LED-Linearmodulen erzielt werden. Anfänglich wurden diese mit einem Diffusor ausgestattet liegend auf der Seitenwand angebracht. Mit dem diffusen Licht waren die Reflexionen der Oberflächenwellen an der Sohle kaum noch zu erkennen. Die Entfernung der Diffusoren und die Drehung der LED-Linearmodule, so dass deren Lichtkegel seitlich unterhalb der Wasseroberfläche in den Wasserkörper einkoppelt, konnten das Ausleuchtungsergebnis nochmals verbessern. Die eingetragene Lichtmenge war deutlich höher, die Gleichmäßigkeit blieb erhalten und störende Reflexionen waren optisch nicht feststellbar. Die installierte Lichtleistung der verbauten LED-Linearmodule entsprach ungefähr 20 000 lm. Die Hälfte kam direkt dem Untersuchungsgebiet zu Gute und je ein Viertel dem vor- und nachgelagerten Bereich.

## 5.2. Unterwasserrekonstruktion

Die Automatismen der eingesetzten SfM-Software, *Metashape*, lieferten im Mehrmedienfall keine befriedigenden Ergebnisse. Auf den ersten Blick sahen die Ergebnisse vielversprechend aus, offenbarten bei näherer Betrachtung jedoch einige Mängel. So waren beispielsweise die Ecken der Modellränder erkennbar nach oben gewölbt und die berechneten Kamerapositionen

## 5. Versuch

wie auch Brennweiten entsprachen nicht ansatzweise den tatsächlichen realen Werten. *Metashape* gestattet es, im begrenzten Maße Einfluss auf die Rekonstruktion zu nehmen und über die angeschlossene Python-API auf alle relevanten Ergebnisse zuzugreifen, so dass eine Auftrennung der SfM-Verfahrensschritte stattfinden konnte. In mehreren vorbereitenden Arbeitsschritten wurden die Verfahrensparameter stufenweise erarbeitet und an die nachfolgenden Verarbeitungsschritte weitergegeben. Mit der Auftrennung und schrittweisen Abarbeitung gelangen qualitativ hochwertige Sohlrekonstruktionen.

Die Vorverarbeitung begann mit einer Luft-Kalibrierung, die die intrinsischen Parameter der einzelnen Kamera-Objektiv-Einheiten aus in der Luft aufgenommenen Schachbrettermustern ableitete. Nach erfolgtem Zusammenbau der Aufnahmeeinheit wurden die Zentren ausgerichtet, so dass der Abstand von Eintrittspupille und Vorsatzlinsen-Zentrum nur wenige Pixel betrug. Im Anschluss folgte für jede Aufnahmeeinheit eine Unterwasser-Kalibrierung, die die durch die Vorsatzlinsen verursachten Verzeichnungen ermittelte. Nach diesen Vorarbeiten starteten die Aufnahmen der Zeitreihen. Am Ende jeder Zeitreihe wurde zur Referenzierung in den Beobachtungsraum ein mobiles Passpunktfeld eingelegt, das half, das Modell in ein sinnvoll definiertes Koordinatensystem zu transformieren. Die Aufnahmen des Passpunktfeldes erfolgten nach Abschluss des Versuches. Nachdem sich die Aufnahmepositionen während des Versuches nicht veränderten, konnten die Passpunktfeldaufnahmen mit in die Vorverarbeitung einbezogen werden. Nach Abschluss jeder Zeitreihe und langsamen Entwässern des Versuches stand zur Qualitätssicherung Luftaufnahmen des Passpunktfeldes. Im Nachfolgenden sind die einzelnen Schritte ausführlich erläutert.

### 5.2.1. Luft-Kalibrierung

Durch die Verwendung eines sich nicht bewegenden Mehrkamera-Verbunds war die Simultankalibrierung außer Stande, zufriedenstellende Resultate zu liefern. Deshalb wurde für jede Kamera-Objektiv-Einheit separat vorab eine Luft-Kalibrierung mit eigens dafür angefertigten Luftaufnahmen eines Schachbrettmusters vorgenommen. Aus zehn Bildern, die in einer stabilen Aufnahmekonfiguration angeordnet waren, wurden die intrinsischen Parameter  $f, c_x, c_y, K_1, K_2, K_3, P_1, P_2$  bestimmt. Auf Basis dieser Parameter konnten die Verzeichnungsmatrizen  $map_{lu}$  der luftseitigen Verzeichnungen erstellt werden. Im Nachfolgenden bezeichnet der Begriff der Verzeichnungsmatrizen zwei Matrizen, die für jedes Pixel eines Bildes dessen korrigierte Positionen vorhalten. Davon ist eine Matrix der x-Richtung und die andere der y-Richtung zuzuordnen.

Die Kamerakalibrierung von *Metashape* ist in der Lage formatfüllende Aufnahmen von Schachbrettmustern, die eher selten vorkommen, zu verarbeiten. Üblicherweise decken die Schachbrettmuster nur einen Teilbereich des Bildes ab (Zhang, 2000, Geiger et al., 2012, Liu et al.,

## 5. Versuch

2016). Viele Algorithmen setzen zur Erkennung von Schachbrettecken voraus, dass deren Anzahl bekannt und das Schachbrett vollständig sichtbar sind, was im Falle von formatfüllenden Aufnahmen schwer zu erreichen ist. Die in *OpenCV* implementierte Schachbrettmustererkennung konnte ebenfalls nicht mit formatfüllenden Aufnahmen von Schachbrettmustern umgehen. Deshalb wurde ein eigens entwickelter Erkennungsalgorithmus implementiert, siehe Anhang B. Der Vorteil formatfüllender Schachbrettermusteraufnahmen besteht darin, dass zur Durchführung einer Kalibrierung weniger Bilder benötigt werden, da die zur Ausgleichung notwendigen Passpunkte den gesamten Bildbereich überdecken.

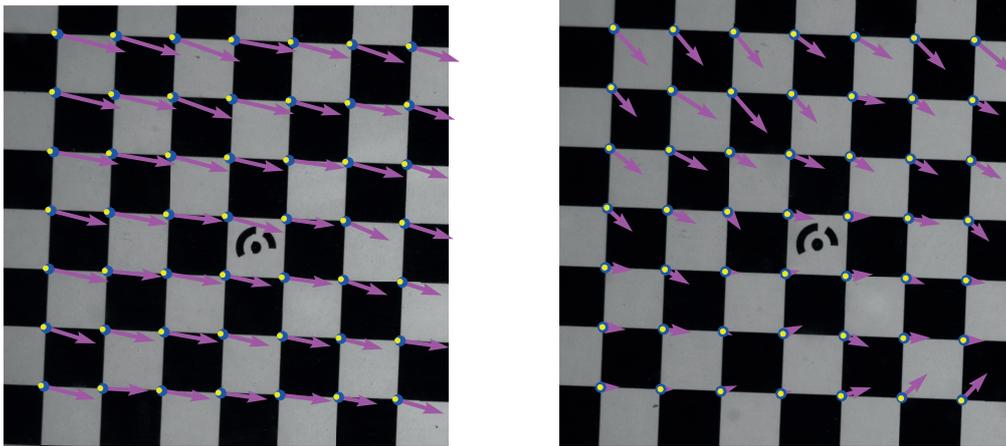
### 5.2.2. Ausrichtung der Zentren

Fällt die Eintrittspupille eines Objektivs mit dem Zentrum einer hemisphärischen Linse zusammen, durchstoßen alle Strahlen die Trennflächen lotrecht und sämtliche Brechungseffekte an den Trennflächenübergängen verschwinden, vorausgesetzt die hemisphärische Linse weist eine konstante Krümmung und gleichmäßige Wandstärke auf. Die Gleichmäßigkeit der Krümmung und Wandstärke hängen vom Herstellungsprozess der Linse ab. Tiefgezogene Linsen aus Kunststoff weisen fertigungsbedingt höhere Toleranzen auf. Die Radien der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten hemisphärischen Linsen variierten um ein bis zwei Millimeter. Zudem zeigten sie verfahrensbedingt minimal inhomogene Wandstärken. Die Anschaffungskosten solcher Linsen liegen bei ca. zehn Euro pro Stück. Glashalbkugeln können mit einer Präzision von wenigen hundertstel Millimetern eingeschliffen werden. Die Anschaffungskosten liegen zwischen einhundert und eintausend Euro, je nach Qualität.

Unabhängig von der Qualität der hemisphärischen Linse ist es essentiell, dass die Eintrittspupille des Objektivs und das Zentrum der hemisphärischen Linse bestmöglich koinzidieren, so dass im Idealfall die Verzeichnungserscheinungen ganz verschwinden. Bereits die Verschiebung um nur einen Millimeter ruft Verzeichnungen im zweistelligen Pixelbereich hervor, wodurch die photogrammetrische Rekonstruktion gestört wird. Durch das im Nachfolgenden beschriebene Zentrierungsverfahren gelang es die maximal auftretenden Verzeichnungen im einstelligen Pixelbereich zu halten.

Nachdem die intrinsischen Parameter aller Kamera-Objektiv-Einheiten aus der Luft-Kalibrierung vorlagen und die Kamera-Objektiv-Einheiten zentrisch in die Unterwassergehäuse eingesetzt waren, konnte mit der Zentrumsausrichtung begonnen werden. Die Freiheitsgrade und Fertigungstoleranzen erlaubten in aller Regel eine grobe Vorausrichtung der Zentren auf zwei bis drei Millimeter. Nacheinander wurden die Aufnahmeeinheiten auf einen steif ausgebildeten Rahmen, der auch das Kalibrierfeld trug, aufgespannt. Der Abstand zwischen Kamera und Kalibrierfeld entsprach in etwa dem späteren Messabstand, wobei der Kamerasensor parallel zum Kalibrierfeld ausgerichtet war. Begonnen wurde mit Aufnahmen im trockenen Zustand

## 5. Versuch



(a) gelungene grobe Ausrichtung mit einer mittleren Verzeichnung von ca. sechs Pixel

(b) feinjustierte Ausrichtung mit einer mittleren Verzeichnung von ca. zwei Pixel

Abbildung 5.4.: Verzeichnungsmuster nach Grob- und Feinausrichtung; die Länge der Vektoren bemisst sich an der maximal auftretenden Verzeichnung; während die Verzeichnungen bei grober Ausrichtung klar erkennbare tangentiale Anteile aufweisen folgen die Verzeichnungen nach erfolgter Feinjustierung keinem erkennbaren Muster

ohne Vorsatzlinse, die als Referenz dienten. Im Anschluss folgten die Montage der Vorsatzlinse und die Befüllung des Gerinnes. Nachdem die Vorsatzlinse vollständig ins Wasser eintauchte, konnte mit den Unterwasseraufnahmen fortgefahren werden. Um die Folgen der Linsen-Dezentrierung sichtbar zu machen, wurden die Lageverschiebungen der unter Wasser aufgenommenen Schachbrettecken subpixelgenau mit Hilfe des im Anhang B beschriebenen Verfahrens lokalisiert und als Vektorfeld dargestellt, siehe Abbildung 5.4. Sowohl die in der Luft aufgenommenen Referenzaufnahmen als auch die Unterwasserbilder wurden vor Beginn der Auswertung mit den Verzeichnungsmatrizen  $map_{lu}$  von Objektivverzeichnungen befreit, so dass ausschließlich die durch die Vorsatzlinsen verursachten Verzeichnungen sichtbar wurden.

Je nachdem, ob die Verzeichnungsmuster tangential oder axial dominiert waren, musste entweder die Vorsatzlinse oder die Kamera-Objektiv-Einheit minimal verschoben werden. Solange ausschließlich die hemisphärische Vorsatzlinse verschoben wurde, behielten die trockenen Referenzaufnahmen ihre Gültigkeit. Durch eine Verschiebung der Kamera-Objektiv-Einheit änderte sich der Bezug zwischen Kamera und Kalibrierfeld, wodurch neue Referenzaufnahmen fällig wurden. Mit dem Erreichen einer mittleren Verzeichnung von zwei bis drei Pixeln wurde die Feinjustierung eingestellt. Zum Abschluss wurde die Lage der Vorsatzlinse durch zwei anpassbare Anschlagblöcke gesichert. So konnte die Vorsatzlinse bei Bedarf abgenommen und in gleicher Position wieder angebracht werden. Das beschriebene Vorgehen reduziert die mittleren Verzeichnungen auf wenige Pixel, was im Rückschluss bedeutet, dass die Zentren bis auf wenige zehntel Millimeter zueinander ausgerichtet sind. Abbildung 5.4 illustriert Verzeichnungsmuster vor und nach erfolgter Feinausrichtung. Vor der erfolgten Feinausrichtung zeigte das Vektorfeld

## 5. Versuch

der Verzeichnungen ein stark ausgeprägtes und klar zu identifizierendes Verzeichnungsmuster. Nach Abschluss der Feinjustierung verblieben geringe Restanteile der radialsymmetrischen und radialasymmetrischen Verzeichnungen sowie lokale Verzeichnungserscheinungen, die in den Vordergrund rückten.

### 5.2.3. Unterwasser-Kalibrierung

Die Unterwasser-Kalibrierung hatte zur Aufgabe, die Restverzerrungen, die nach Abschluss der Zentrumsausrichtung weiterhin bestanden, zu quantifizieren und zu deren Kompensation Verzeichnungsmatrizen  $map_{uw}$  bereitzustellen.

Mit der auf dem Kalibrierfeld aufgespannten Aufnahmeeinheit wurden, wie auch schon bei der Zentrumsausrichtung, zuerst zehn Bilder ohne Vorsatzlinse im trockenen Zustand gemacht. Anschließend wurde die Vorsatzlinse angebracht und der Versuchsstand bis zum Eintauchen der Vorsatzlinse befüllt, um dann zehn Unterwasseraufnahmen anzufertigen. Ehe mit der Erkennung der Schachbrettecken begonnen werden konnte, wurden alle Bilder mit den Verzeichnungsmatrizen  $map_{lu}$  entzerrt, so dass die nachfolgende Auswertung ausschließlich die Verzeichnungen der Vorsatzlinsen herausarbeitete. Die Erkennung der Schachbrettecken verlief über das im Anhang B beschriebene Verfahren. Im Prinzip könnten die Verzeichnungen der Vorsatzlinsen dank der formatfüllenden Schachbrettmustererkennung aus nur zwei Bildern, einer Luft- und einer Unterwasser-Aufnahme, ermittelt werden. Allerdings zeigte sich bei der Auswertung, dass die eingemessenen Positionen der Schachbrettecken von Aufnahme zu Aufnahme leicht variierten, obwohl der Versuchsstand in dieser Zeit unangetastet blieb. Die Schwankungen lagen unter einem Zehntel eines Pixel und ließen sich mit bloßem Auge nicht wahrnehmen. Zur Absicherung des Ergebnisses wurden deshalb mehrere Aufnahmen gemacht und daraus die medianen Eckpositionen ermittelt. Aus der Differenz der medianen Luft- und Unterwasser-Eckpositionen ging ein dünn besetztes Vektorfeld der Unterwasser-Verzeichnungen hervor, das trotz aller Sorgfalt vereinzelt Ausreißer zeigte, siehe Abbildung 5.5a. Ursächlich waren winzige auf dem Kalibrierfeld anhaftende Luftblasen und Oberflächendefekte auf den Vorsatzlinsen. Ein Schiebefenster-Algorithmus (engl. sliding-window approach) erkannte und ersetzte die Ausreißer. Pixelweise untersuchte er hierzu das Bild und verglich inwieweit Betrag und Richtung einer Zelle vom Medianwert für Betrag und Richtung, der aus den Zellen der direkten Nachbarschaft gebildet wurde, abwichen. Sobald sich die Richtung mehr als 0,1 rad oder der Betrag der Verzeichnung sich um mehr als 0,5 Pixel von den jeweiligen Medianwert unterschieden, ersetzte der Algorithmus die Verzeichnung der aktuellen Zelle durch die mediane Verzeichnung der Nachbarzellen. Abschließend übertrug ein auf radialen Basisfunktionen basierendes Interpolationsverfahren die Verzeichnungswerte des korrigierten dünnbesetzten Vektorfeldes auf die Verzeichnungsmatrizen  $map_{uw}$ , illustriert in Abbildung 5.5b.

## 5. Versuch

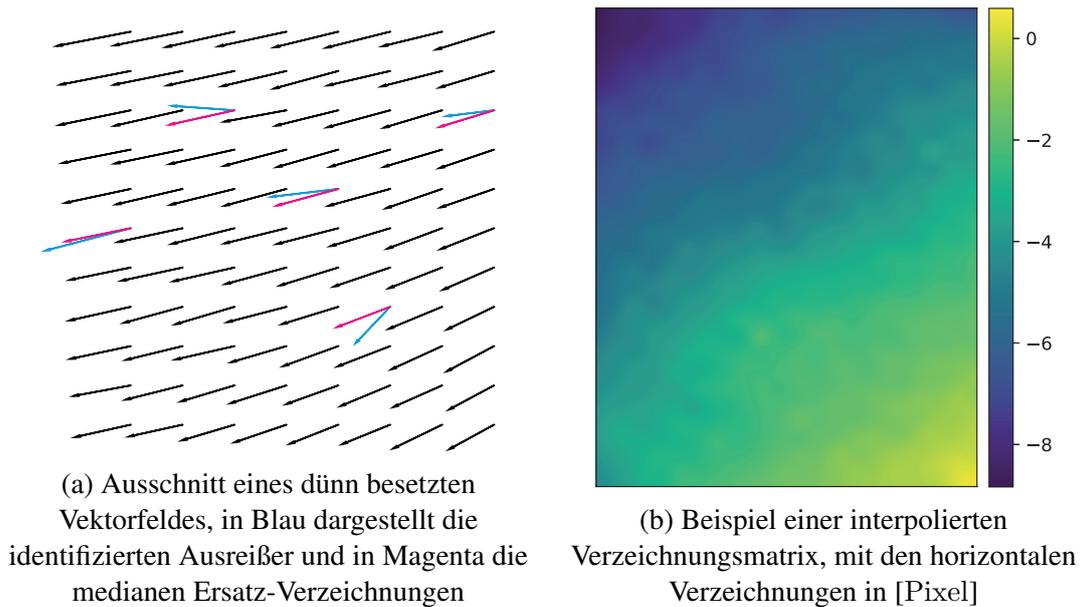


Abbildung 5.5.: Unterwasser-Kalibrierung. Ausschnitt eines dünn besetzten Vektorfeldes und eine beispielhafte Verzeichnungsmatrix

Um die Abstandsabhängigkeit der Unterwasser-Verzeichnungen mit ins Verfahren aufnehmen zu können, wurde die Unterwasser-Kalibrierung für drei unterschiedliche Kalibrierfeldabstände durchgeführt. Der mittlere Aufnahmeabstand entsprach mit etwa 275 mm der festgelegten Messentfernung. Die beiden anderen Aufnahmeabstände befanden sich je ungefähr fünf Zentimeter darüber bzw. darunter. So entstanden für jedes Pixel drei Unterwasser-Verzeichnungswerte, die in einer 3D-Unterwasser-Verzeichnungsmatrix zusammengefasst werden konnten. Zusammen mit dem bekanntem Aufnahmeabstand ließen sich über eine lineare Interpolation aus der 3D-Unterwasser-Verzeichnungsmatrix für jedes Pixel dessen abstandskorrigierte Verzeichnungswerte bestimmen. Da der Aufnahmeabstand eines Pixel a priori jedoch unbekannt ist, konnte die abstandsabhängige Korrektur erst mit Bekanntsein einer approximativen Sohlrekonstruktion in einem nachgeschalteten Korrekturschritt erfolgen.

Die abstandsabhängige Korrektur der Unterwasser-Verzeichnungen ist auch aus Sicht der schräg ins Messgestell eingebauten Aufnahmeeinheiten von Interesse. Durch die Verkippung unterschied sich die Aufnahmelage der Kamera von deren Blickrichtung, die während der Kalibrierung vorherrschte. Die aus dem Schrägeinbau resultierende Abstandsvariation betrug in etwa zehn Zentimeter, siehe Abbildung 5.9a. Um die Aufnahmeentfernung für eine Korrektur zu nutzen, musste die Sohltopographie erst einmal approximativ rekonstruiert werden. Hierzu wurden die Bilder unter Annahme eines konstanten Aufnahmeabstandes, der dem festgelegten Messabstand entsprach, entzerrt. Sofern die Ausrichtung der Zentren fein genug vorgenommen wurde, beliefen sich die durch die Verkippung verursachten Verzeichnungen auf ein bis zwei Pixel. Die daraus resultierenden Qualitätseinbußen waren bei einer grob aufgelösten Punktwolke kaum

## 5. Versuch

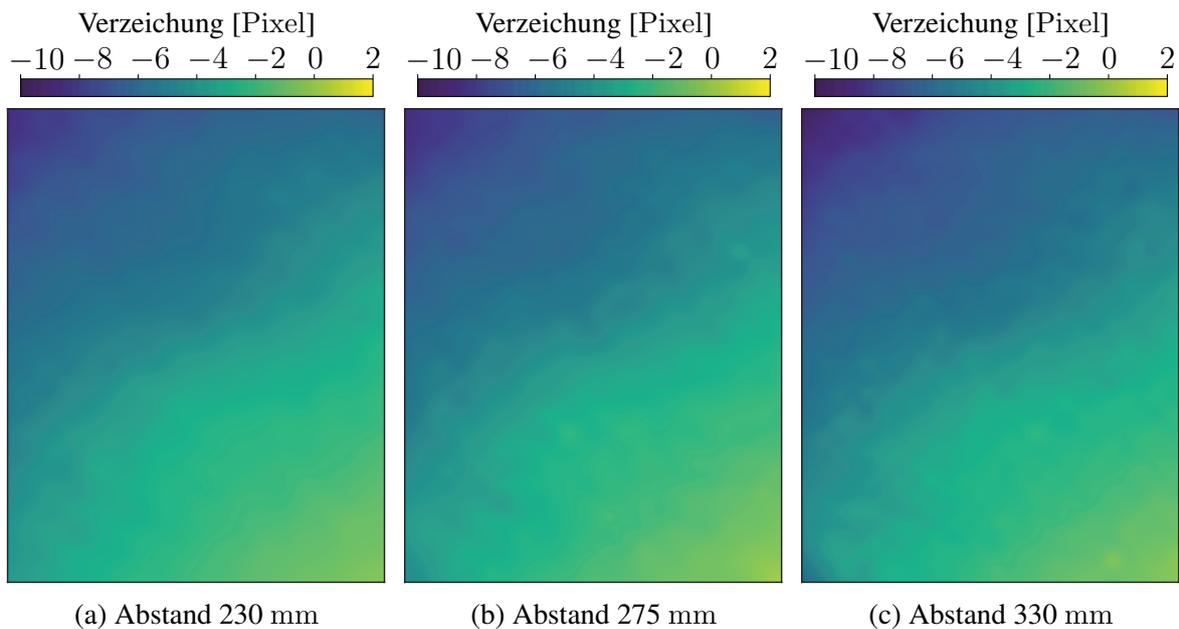


Abbildung 5.6.: Abstandsabhängigkeit der Verzeichnung

auszumachen. Die mittlere Sohlloge wurde durch die Approximation bereits bis auf wenige Millimeter genau getroffen.

In Abbildung 5.6 sind beispielhaft die horizontalen Unterwasser-Verzeichnungen für drei unterschiedliche Aufnahmeabstände gegenüber gestellt. Darin erkennbar ist eine diagonale Front, die von der linken unteren Ecke nach rechts oben verläuft. Diese Front verschiebt sich mit zunehmendem Aufnahmeabstand in Richtung der rechten unteren Ecke. Numerisch unterscheiden sich die Verzeichnungen der Aufnahmeentfernung von 230 mm auf 330 mm um maximal 2,36 Pixel und um 0,36 Pixel im Mittel. Daraus wurde geschlossen, dass die Approximation der Sohltopographie, die die Sohlloge auf wenige Millimeter genau trifft, ausreicht, um die Abstandsabhängigkeit zu beschreiben. Von einer Korrekturschleife, die die Abstände aus dem Modell der approximativen Lösung extrahiert, wurde abgesehen, da die zu erwartenden Verbesserungen von ungefähr 0,1 Pixel im Maximum und von 0,02 Pixel im Mittel im Rahmen der Messungenauigkeit liegen.

### 5.2.4. Mobiles Passpunktfeld

Am Ende jeder Versuchsreihe wurden ein kleines mobiles Passpunktfeld in den Beobachtungsraum eingelegt und Unterwasseraufnahmen davon angefertigt. Beim Einlegen wurde versucht das Passpunktfeld bei Durchführung einer Versuchsreihe immer an ähnlicher Stelle einzulegen. Ein über die Versuchsreihen hinweg übergreifender Vergleich ist mit diesem Vorgehen jedoch nicht möglich. Das mobile Passpunktfeld bestand aus einem massiven PVC L-Winkel, der eine

## 5. Versuch

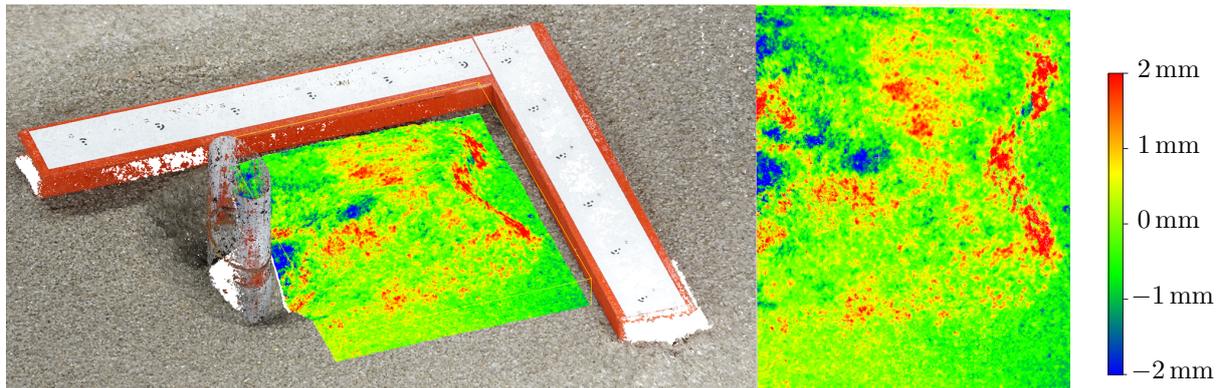


Abbildung 5.7.: Qualitätssicherung - Links ist der Endzustand eines Pfeilerkolkversuchs mit dem mobilen Passpunktfeld dargestellt. Im Nachlaufbereich des elliptischen Pfeilers ist die Differenz zwischen der in Luft und der unter Wasser gewonnenen Punktwolke in [mm] aufgetragen. Rechts dargestellt ist, eine Draufsicht auf das Differenzfeld.

Tabelle 5.2.: Statistische Parameter zur Qualitätssicherung. Differenz zwischen trockener und unter Wasser aufgenommener Punktwolke und die daraus bestimmten mittleren Abweichungen  $dz_m$ , Standardabweichungen  $s$ , maximalen Abweichung  $dz_{max}$  und minimalen Abweichung  $dz_{min}$ .

Versuch	$dz_m$ [mm]	$s$ [mm]	$dz_{max}$ [mm]	$dz_{min}$ [mm]
Einkornmaterial	0,3	0,7	5	-5
Mehrkornmaterial	-0,4	0,7	8	-7

Kantenlänge von ca. 300 mm maß und mit kodierten Passpunkten bestückt war. Die Bildposition kodierter Passpunkte erkennt *Metashape* automatisch. Über ein Skript wurden ihnen ihre hinterlegten Referenzkoordinaten zugeordnet, so dass die SfM-Rekonstruktion das entstehende Modell in das lokale Referenzsystem einbetten konnte. Von der Einbringung fester sohnaher Referenzmarken wurde abgesehen, da diese die kleinräumigen Versuche zu sehr gestört hätten. Nach Entleerung des Versuchsstandes entstanden zur Qualitätssicherung zusätzlich Luftaufnahmen des Passpunktfeldes, siehe Abbildung 5.7. Der in der Luft aufgenommene Bereich wurde für den Vergleich auf die Abmessung der Unterwasserpunktwolke beschnitten. In Tabelle 5.2 sind die statistischen Qualitätskenngrößen beider Versuche angegeben, die die hohe Güte der Modell widerspiegeln.

### 5.2.5. Unterwasser-SfM

Die Unterwasser-SfM wurde mit unterschiedlichen Eingangsdaten durchlaufen. In der ersten Ausbaustufe, ihrer einfachsten Form, vernachlässigte sie sowohl die Unterwasser-Verzeichnungen als auch deren Abstandsabhängigkeit und berücksichtigte ausschließlich die Luft-Kalibrierung

## 5. Versuch

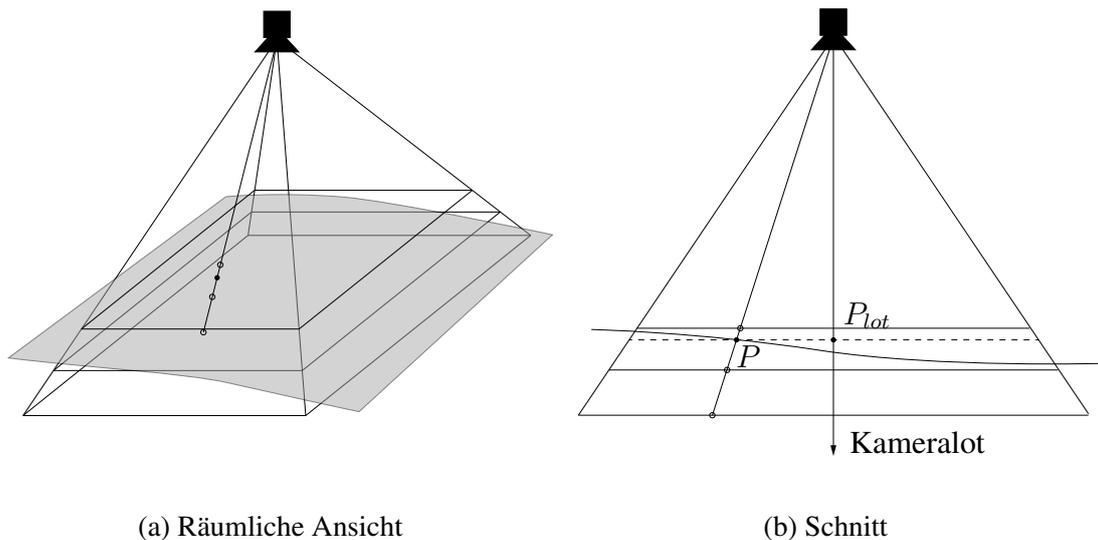


Abbildung 5.8.: Die Ebenen der 3D-Unterwasser-Verzeichnungsmatrix, die aus von in unterschiedlicher Distanz aufgenommenen Kalibrierfeldaufnahmen gewonnen sind, und ein Objektraumstrahl mit seinen Durchstoßpunkten durch die Kalibrierflächen. Die Freiformfläche deutet eine mögliche räumliche Sohlage an, deren Durchstoßpunkte ebenfalls markiert sind.

Die Schnittabbildung zeigt zudem die Projektion des Durchstoßpunktes  $P$  auf das Lot der Kamera  $P_{lot}$

und Aufnahmen des Passpunktfeldes. Eine gute bis sehr gute Zentrumsausrichtung vorausgesetzt, ergaben sich so bereits erste, durchaus befriedigende Rekonstruktionsergebnisse. In den Überlappungsbereichen der Bildränder rauschte die Punktwolke erheblich, was auf die fehlende Unterwasser-Korrektur zurückzuführen war. In der nächsten Ausbaustufe wurden die Bilder der Zeitreihe näherungsweise mit der als konstant angenommenen mittleren Aufnahmeentfernung entzerrt. Die tatsächlichen Aufnahmeentfernungen der einzelnen Pixel waren zu diesem Zeitpunkt noch nicht bekannt. Die auf diese Weise gewonnenen Sohltopographien zeigten ein vermindertes Rauschverhalten, das in den Überlappungsbereichen der Bildränder jedoch weiterhin bestand, hervorgerufen durch die Verkippungen der Aufnahmeeinheiten.

Um die Korrektur der Unterwasser-Verzeichnungen mit korrektem Aufnahmeabstand vornehmen zu können, mussten die Aufnahmeabstände der einzelnen Pixel erhoben werden. Die Aufnahmeabstände sind als lotrechter Abstand zur Kamera definiert, siehe Abbildung 5.8b. Sie sind den Sohlbewegungen, die eine Veränderung des Aufnahmeabstandes bewirken, nachzuführen. Zur Berechnung der Aufnahmeabstände wurden in *Metashape* für jeden Zeitschritt aus grob aufgelösten Punktwolken glatte Oberflächenmodelle der Sohle erstellt. Mit den grob aufgelösten Punktwolken gelang es, die Sohlrauheit gewissermaßen zu unterdrücken. Feinere Strukturen verschwanden ab einer Auflösung von ungefähr einem Punkt pro Quadratmillimeter vollstän-

## 5. Versuch

dig und es verblieb eine Punktwolke, die die Oberfläche der Sohle repräsentierte. In *Metashape* wurde diese räumlich vernetzt, ausgedünnt und abschließend zur Weiterverarbeitung ausgespielt. Als weitere Bausteine wurden aus *Metashape* die Kamerapositionen, deren Blickrichtung und Brennweiten extrahiert. Mit diesen Informationen konnten Strahlwege einzelner Pixel simuliert werden, welche sodann mit der ausgespielten Sohltopographie verschnitten wurden. Zur Schnittpunktbestimmung kamen die Open Source Bibliotheken von *VTK* zum Einsatz, zu dessen Standardrepertoire die Verschneidungen einer Linie mit einer Oberfläche gehört. Aus Effizienzgründen wurden nicht alle Pixel räumlich verschnitten, sondern ein stark ausgedünntes Strahlenbündel, das ungefähr einen Abstand von 100 Pixel aufwies. Um auf die lotrechten Aufnahmeabstände zu schließen, wurden die Schnittpunkte  $P$  auf das Kameralot projiziert  $P_{lot}$ , siehe Abbildung 5.8b. Ein auf radialen Basisfunktionen beruhendes Interpolationsverfahren übertrug die für das ausgedünnte Strahlenbündel ermittelten lotrechten Aufnahmeabstände auf alle Pixel, woraus eine Matrix der Abstände  $map_{abstand}$  hervorging. Das Ergebnis ist in den Abbildungen 5.9a und 5.9b zu sehen. Daraus ist ersichtlich, dass sich durch den Schrägeinbau die Aufnahmeabstände in den Ecken um bis zu fünf Zentimeter verschoben. Die Abstandsänderungen, die sich aus der zeitlichen Entwicklung ergaben, betragen im vorliegenden Beispiel ungefähr zwanzig Millimeter, siehe Abbildung 5.9c. Mit den bekannten lotrechten Aufnahmeabständen und 3D-Unterwasser-Verzeichnungsmatrizen wurden die abstandskorrigierten Unterwasser-Verzeichnungen berechnet, siehe Abbildungen 5.9d und 5.9e. Der Unterschied zwischen den beiden Verzeichnungsmatrizen wird erst durch die Differenzbildung in Abbildung 5.9f sichtbar. Die Differenz beträgt für Bereiche, die eine Abstandsänderung von ungefähr 30 mm aufweisen, etwa 0,2 Pixel. Derart feine Korrekturen kommen nur Rekonstruktionen zu Gute, die höchste Anforderungen an die Qualität stellen. In der finalen Ausbaustufe wurden die Bilder der Zeitreihe mit den abstandsabhängigen 3D-Unterwasser-Verzeichnungsmatrizen  $map_{ww}$  und den Abständen  $map_{Abstand}$  entzerrt und dann in das Einmedien-SfM-Verfahren gegeben.

Die Qualitätsunterschiede der unterschiedlichen Ausbaustufen arbeitet die Abbildung 5.10 heraus. Dort sind Orthophotos, hochaufgelöste Punktwolken und räumliche Vermaschungen der unterschiedlichen Ausbaustufen gegenübergestellt. Die Orthophotos, dargestellt in Abbildung 5.10a, geben nur geringfügige Unterschiede zwischen der ersten Ausbaustufe und den beiden anderen, die sich als minimale Verschiebung des Bildes äußern, zu erkennen. Die hochaufgelösten Punktwolken, die in Abbildung 5.10b gezeigt sind, wurden mit den Bildfarben eingefärbt. Diese Darstellung gibt anhand der kleinen weißen Löcher all diejenigen Orte zu erkennen, an denen keine Rekonstruktion erfolgen konnte. Die Gründe sind entweder, dass die stereometrische Detailrekonstruktion fehlschlug, da die Pixel nicht zusammen passten oder dass in Folge von Abschattung, Teilbereiche verdeckt blieben. In der ersten Ausbaustufe ist die Anzahl an weißen Löchern vergleichsweise hoch, nimmt aber mit jeder Ausbaustufe ab. Die selben

## 5. Versuch

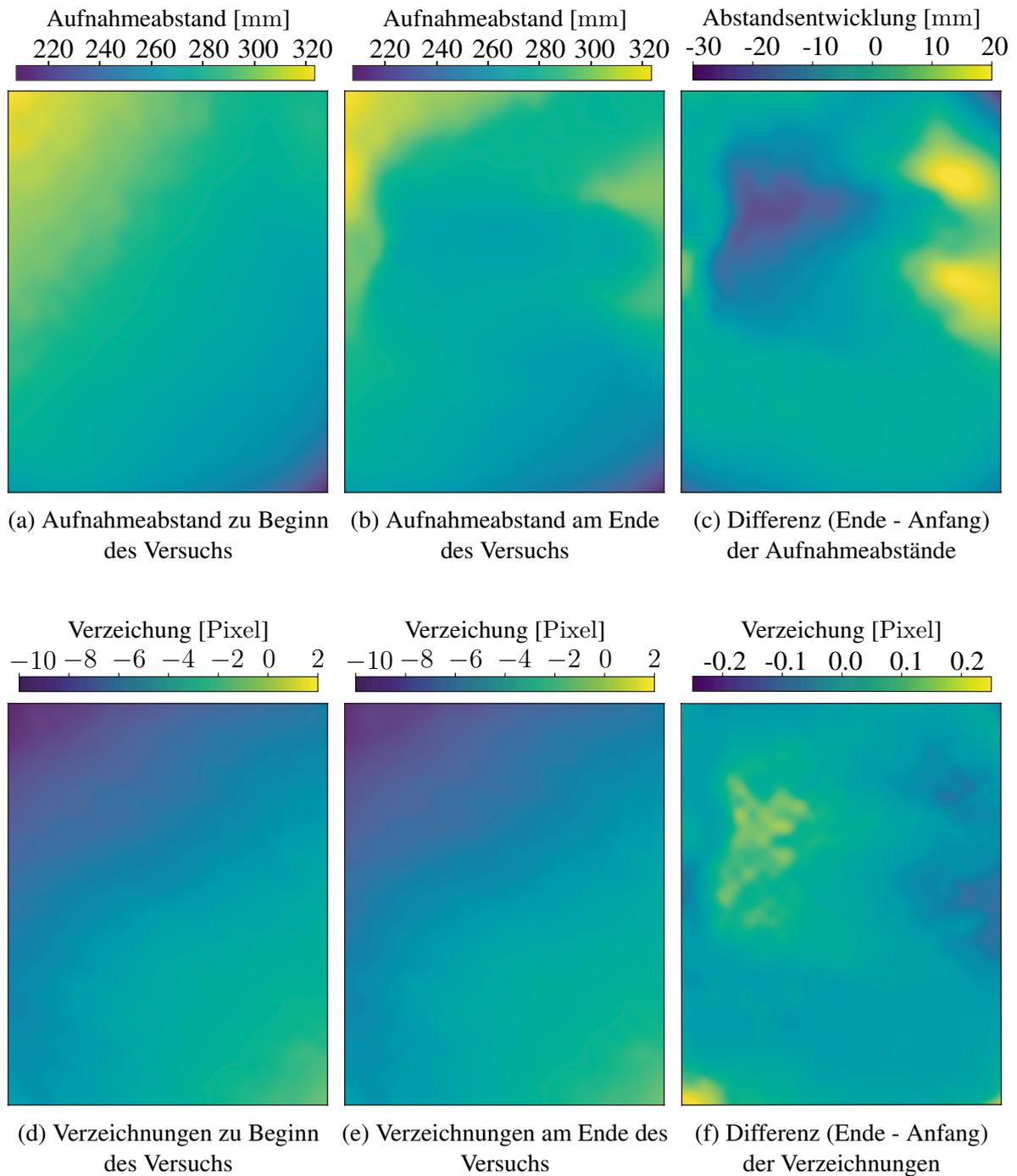


Abbildung 5.9.: Die Veränderungen der Verzeichnung im Verlauf eines Versuchs infolge der Sohländerungen. Die Aufnahmeabstände einer Kamera sind oben aufgetragen und unten sind die daraus resultierenden Verzeichnungen dargestellt.

## 5. Versuch

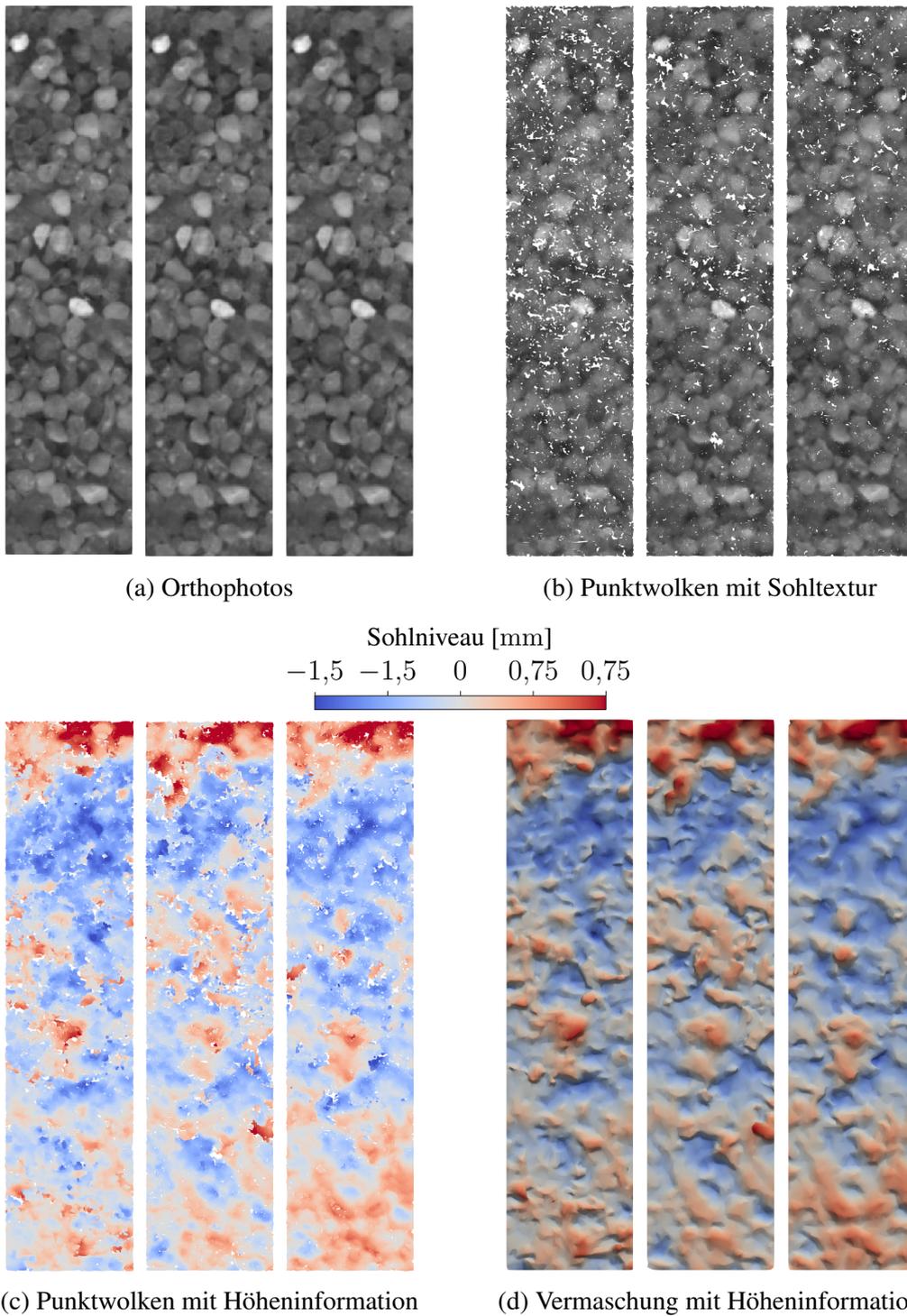


Abbildung 5.10.: Eine Gegenüberstellung von ein Zentimeter breiten und fünf Zentimeter langen Streifen der unterschiedlichen Unterwasser-SfM-Ausbaustufen. Die einfachste Form der Unterwasser-SfM ist stets ganz links dargestellt, in der Mitte die zweite Ausbaustufe und ganz rechts die finale Ausbaustufe, die einer abstandsabhängigen Unterwasser-Verzeichnungskorrektur unterzogen wurde

## 5. Versuch

hochaufgelösten Punktwolken, eingefärbt mit den Höheninformation, siehe Abbildung 5.10c, erscheinen in den ersten beiden Ausbaustufen noch sehr unruhig. Erst in der finalen Ausbaustufe wird die Sohlstruktur zu Teilen auch in den Höheninformationen erkennbar. Dabei erscheinen einzeln gelegene, exponierte Sedimentkörner relativ klar, wohingegen die Grenzen von im Verbund vorliegenden Strukturen verschwimmen. Die räumlichen Vermaschungen der Punktwolken sind in Abbildung 5.10d gegenübergestellt. Dort zeigen sich in der finalen Ausbaustufe die klarsten Strukturen und nur wenige Störstrukturen. Im Gegensatz dazu zeigen die Ausbaustufen eins und zwei Störstrukturen, die eine Folge des Rauschen sind und bei der räumlichen Vernetzung zu unsinnigen Ausformungen führen.

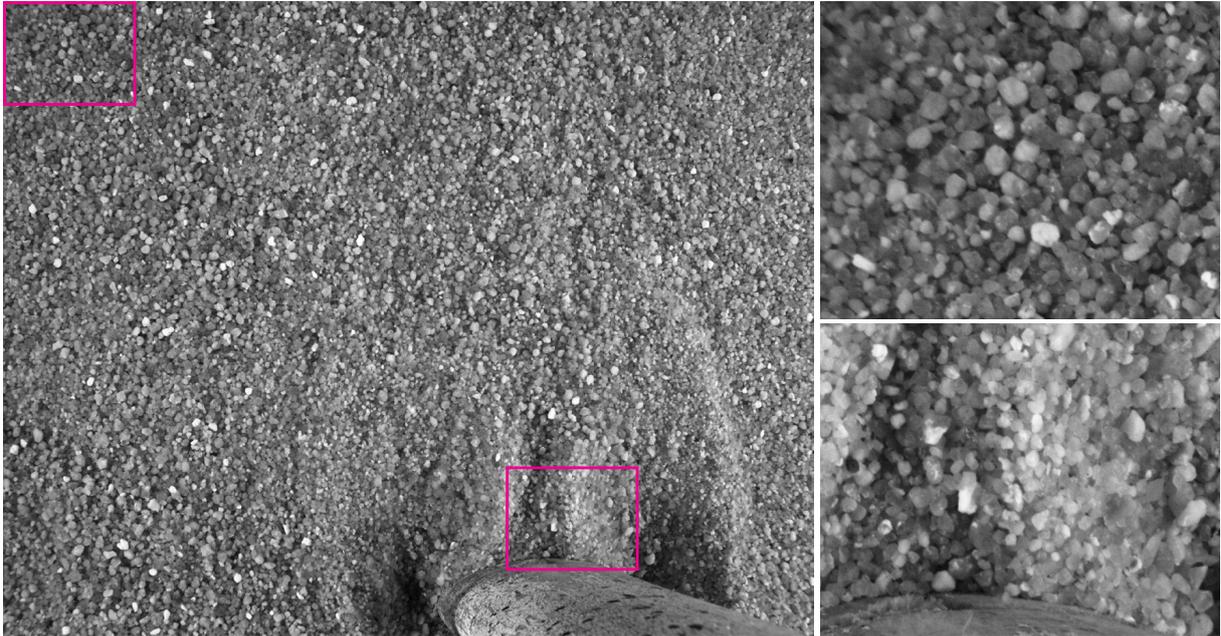
### 5.3. Ergebnisdaten

#### 5.3.1. Bilddaten

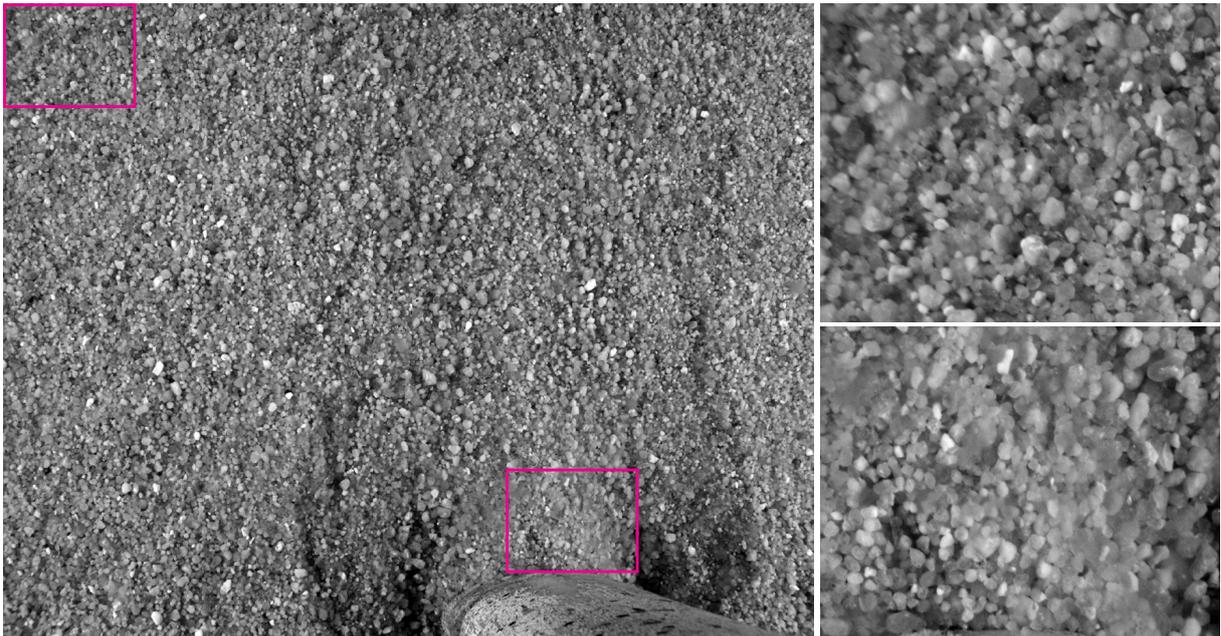
Die fein aufeinander abgestimmte Kombination aus Kamera-Objektiv-Einheit, hemisphärischer Vorsatzlinse und Beleuchtung machte es möglich, in den begleitenden Versuchen Unterwasserbilder von hoher Güte anzufertigen. In Abbildung 5.11 sind beispielhaft zwei unbearbeitete Unterwasseraufnahmen abgedruckt. Unter optimalen Aufnahmebedingungen gelangen gestochen scharfe Bilder, siehe Abbildung 5.11a. Lediglich in den äußersten Eckbereichen litt die Schärfe etwas. Die einzelnen Sedimentkörner, die einen mittleren Durchmesser von 1,6 mm besitzen, können durch in Augenscheinnahme zumeist eindeutig identifiziert werden. Ausgenommen davon sind Bereiche, in denen es zu einer Anhäufung kleiner Körner kommt oder in denen die farbliche Akzentuierung zwischen den einzelnen Körnern sich zu gering voneinander unterscheidet. Dort verschwimmen die Korngrenzen ineinander und erschweren die Einzelkornerkennung, siehe unterer vergrößerter Ausschnitt in Abbildung 5.11a. Sobald der Versuch über längere Zeit lief, hefteten sich unweigerlich Luftblasen an den hemisphärischen Vorsatzlinsen an. Die luftgefüllten Blasen wirkten als Zusatzlinsen und minderten die Bildqualität lokal. In den Aufnahmen erscheinen diese Bereiche verschwommen, siehe Vergrößerungen in Abbildung 5.11b.

Die Belichtungszeit  $\Delta t$  betrug zwischen acht und zwanzig Millisekunden, je nach Versuch. Mit einer Belichtungszeit von zwanzig Millisekunden konnten gut ausgeleuchtete Bilder gewonnen werden, die nicht aufbereitet werden mussten. Bis zu einer Reduktion auf acht Millisekunden reichte das Licht im Zusammenspiel mit einer Aufhellung durch eine Gamma-Korrektur gerade noch aus, um die einzelnen Sedimentkörner anhand ihrer Farbintensität voneinander zu unterscheiden. Aus der maximal zulässigen Bewegungsunschärfe, die ein Pixel  $u = 4,8 \mu\text{m}$  nicht überschreiten sollte, kann zusammen mit der Bildmaßstabszahl  $m = 22$  auf die zulässige Einzelkorngeschwindigkeit geschlossen werden  $u_{ek} = \frac{u \cdot m}{\Delta t}$  (Luhmann, 2018).

## 5. Versuch



(a) Unterwasseraufnahme unter optimalen Bedingungen: gleichmäßige Ausleuchtung und keine anheftenden Luftblasen



(b) Unterwasseraufnahme mit einigen an der Vorsatzlinse anheftenden Luftblasen

Abbildung 5.11.: Beispielbilder von Unterwasseraufnahmen des weit gestufteren Sohlmaterials. Dargestellt sind die Bildrohdaten, die noch nicht weiter prozessiert wurden. Rechter Hand sind jeweils zwei Bildausschnitte um den Faktor drei vergrößert dargestellt.

## 5. Versuch

Für die gewählten Belichtungszeiten  $\Delta t$  ergeben sich so maximal zulässige Einzelkorngeschwindigkeiten  $u_{ek,max}$  zwischen  $0,006 \text{ m s}^{-1}$  und  $0,013 \text{ m s}^{-1}$ . Verglichen mit den von Pflieger (2010) ermittelten Einzelkorngeschwindigkeiten, die für ein ähnliches Sediment zu  $0,1 \text{ m s}^{-1}$  abgeschätzt wurden, wäre demnach die Belichtungszeit weiter zu senken. Technisch würden die eingesetzten Kameras *UI-3180CP* eine Absenkung der Belichtungszeit bis auf  $0,052 \text{ ms}$  erlauben, dies entspräche dann einer maximal zulässigen Einzelkorngeschwindigkeit von ungefähr  $2 \text{ m s}^{-1}$ . Die kürzeren Belichtungszeiten hätten jedoch eine Überarbeitung der Beleuchtung bedürft. Von dieser wurde abgesehen, da erste Bewegungen bereits mit einer Belichtungszeit von acht Millisekunden festgehalten werden konnten.

### 5.3.2. Punktwolken

In *Metashape* wird die Qualität der Rekonstruktion durch die Auswahl der Qualitätsstufe festgesetzt, die die ins Verfahren gegebene Bildauflösung definiert. Die zur Rekonstruktion eingesetzten Verfahren und Algorithmen sind für alle Qualitätsstufen die gleichen. In der höchsten Qualitätsstufe verarbeitet *Metashape* die Bilder mit ihrer Originalauflösung. Bei geringeren Qualitätsstufen reduziert *Metashape* die Auflösung der Bilder vor Beginn der Rekonstruktion pro Abstufung um den Faktor vier. Im Zuge der Rekonstruktion von hoch aufgelösten Punktwolken berechnet *Metashape* die Tiefenkarten aller Bilder. Bildrauschen oder unscharfe Bildbereiche führen zu Ausreißern in den Tiefenkarten, die mit einem sanften, moderaten oder starken Filteralgorithmus angegangen werden können. Den Empfehlungen des Handbuchs folgend, sollten Projekte, die darauf abzielen auch feinste Details aufzulösen, eine sanfte Filterung einsetzen, um Details zu erhalten, die eine starke Filterung unter Umständen entfernen würde. In Abbildung 5.12 sind kleine Ausschnitte einer hochaufgelösten Sohlrekonstruktion der höchsten

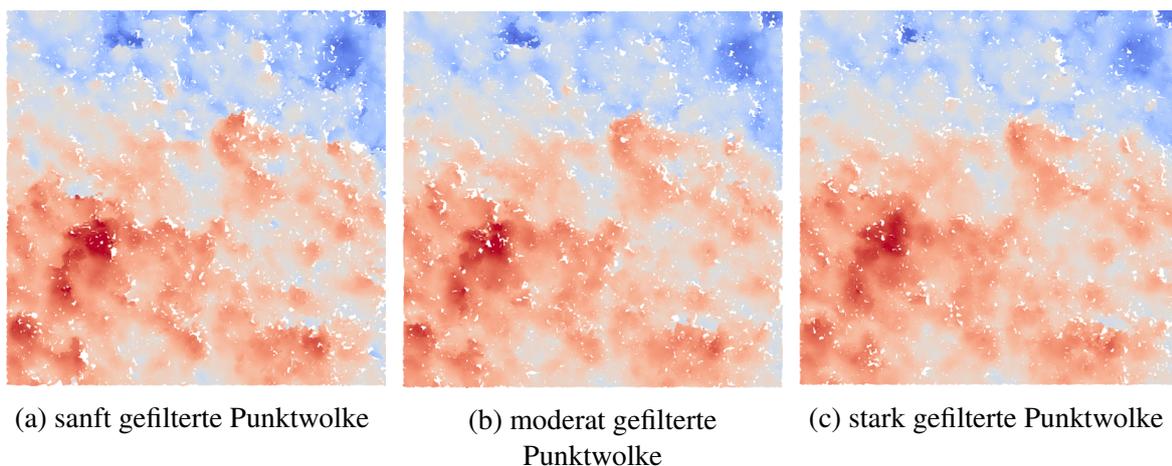


Abbildung 5.12.: Ausschnitte ( $25 \times 25 \text{ mm}$ ) hochaufgelöster Punktwolken der höchsten Qualitätsstufe, die mit unterschiedlichen Algorithmen gefiltert wurden.

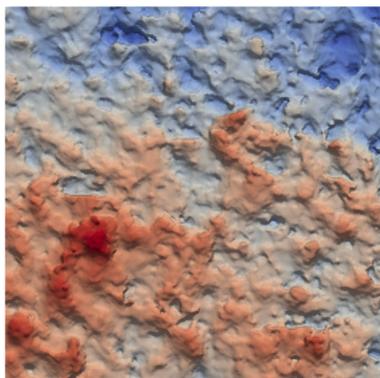
## 5. Versuch

Qualitätsstufe, die mit den drei zur Verfügung stehenden Algorithmen gefiltert worden, dargestellt. Bei einem genauen Vergleich lassen die sanft gefilterten Daten geringfügig mehr Details erkennen, siehe Abbildung 5.12a. Die Unterschiede zwischen den Filtertechniken treten bei der im nächsten Abschnitt behandelten Vernetzung deutlicher zu Tage.

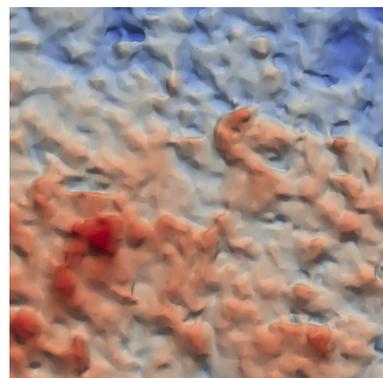
Die rekonstruierten Punktwolken zeigten bei mäßigem Luftblasenbesatz der Vorsatzlinsen kaum Auffälligkeiten. Durch die Redundanzen, die durch die vier Kameras gegeben waren, konnten die meisten Fehlstellen ausgeglichen werden.

### 5.3.3. Vernetzung

Die hochauflösten Punktwolken wurden in einem weiteren Arbeitsschritt vernetzt. *Metashape* bietet die Möglichkeit die Punktwolken 2.5D oder 3D zu vernetzen. Die 2.5D-Vernetzung trianguliert die Punktwolke ohne Berücksichtigung der Höheninformationen. Hierzu wird die Punktwolke in eine Ebene projiziert, dort vernetzt und anschließend mit Höhen versehen. Senkrechte Elemente oder Überhänge bereiten dem 2.5D-Ansatz Probleme, da in diesen Fällen Mehrdeutigkeiten auftreten, die zu Fehlern in der Vernetzung führen. Die 3D-Vernetzung trianguliert die Punktwolke räumlich, ist aber rechenzeitintensiver. Die Berechnungszeit für eine 3D-Vernetzung ist gegenüber der 2.5D-Vernetzung etwa um Faktor zehn bis zwanzig erhöht. In Abbildung 5.13 sind die Ergebnisse beider Vernetzungstechniken gegenübergestellt. Die 2.5D-Vernetzung zeigt eine sehr unruhige und mit einigen Artefakten versehene Sohloberfläche, dagegen wirkt die 3D-Vernetzung glatt und aufgeräumt, obwohl diese nicht speziell aufbereitet wurde. Zur Erfassung der Sohltopographie auf Einzelkornebene erscheint die aufwendigere 3D-Vernetzung lohnenswert, da mit ihr steile Gradienten und sogar Überhänge modellierbar sind. Für die Vernetzung sind in *Metashape* die Datengrundlage, der Algorithmus, die Anzahl an gewünschten Flächenelementen und das Interpolationsverfahren zu wählen. Als Datengrundlage



(a) 2.5D-Vernetzung



(b) 3D-Vernetzung

Abbildung 5.13.: Gegenüberstellung der Vernetzungstechniken von *Metashape*

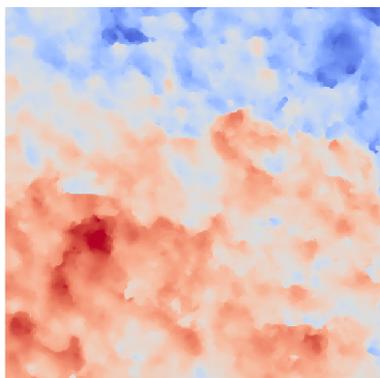
## 5. Versuch

kann auf die dünn-besetzte Punktwolke, die hochaufgelöste Punktwolke oder die Tiefenkarten zurückgegriffen werden. Für den nachfolgenden Vergleich wurden ausschließlich die beiden Letzteren herangezogen, da aus den dünn-besetzten Punktwolken die einzelnen Sedimentkörner nicht hervorgehen. Die Unterschiede, die sich durch die Wahl der Datengrundlage ergeben sind in Abbildungen 5.15a bis 5.15f mit kleinen Ausschnitten illustriert. Daraus ist ersichtlich, dass die Vernetzungen auf Basis von Tiefenkarten glatter und die Umrisse der einzelnen Körner weniger gut erkennbar sind. Die Filterung der Punktwolke lässt im Falle einer starken Filterung und anschließender 3D-Vernetzung kleinere Details verloren gehen. Die Anzahl an gewünschten Flächenelementen wird über die Auswahl einer Qualitätsstufe oder direkt durch eine Benutzereingabe festgesetzt. Mit Aktivierung der Interpolationsoption können kleinere Löcher im Netz durch die Vernetzung geschlossen werden.

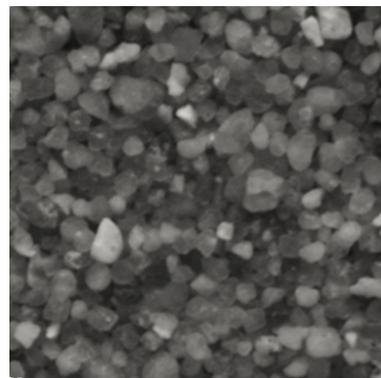
Auf Basis der Empfehlungen und Erkenntnisse, die in diesem Abschnitt erläutert wurden, erscheint die räumliche Vernetzung einer sanft gefilterten Punktwolke am geeignetsten, um daraus Aussagen auf Einzelkornebene treffen zu können. Alle nachfolgenden zur Auswertungen herangezogenen Netze wurden mit dieser Einstellung erstellt.

### 5.3.4. Digitales Geländemodell und Orthophotos

Ein digitales Geländemodell repräsentiert die Geländeoberfläche in Form eines ebenen und regelmäßigen Rasters, das pro Rasterzelle einen Höhenwert besitzt. Senkrechte Wände oder Überhänge können in einem digitalen Geländemodell nicht dargestellt werden. Allerdings erleichtert die Rasterung die Weiterverarbeitung und Auswertung erheblich. Gerade mit Hinblick auf die Erhebung von räumlichen Kennzahlen, wie etwa der Rauheit, spielt dies eine Rolle. Zur Rasterung wird die Punktwolke mit einem regelmäßigen Raster überzogen und für jede Rasterzelle der Mittelwert aus allen in dieser Zelle liegenden Punkte gebildet. Da die Punktwolke



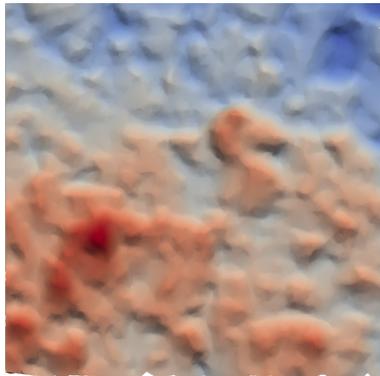
(a) Digitales Geländemodell



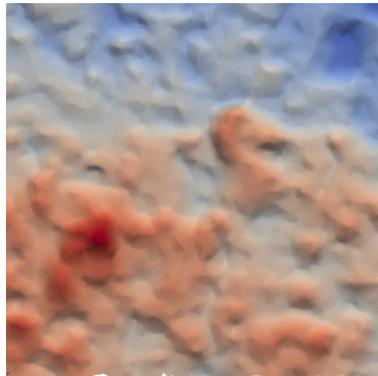
(b) Orthophoto

Abbildung 5.14.: Weiterverarbeitungsprodukte aus *Metashape*

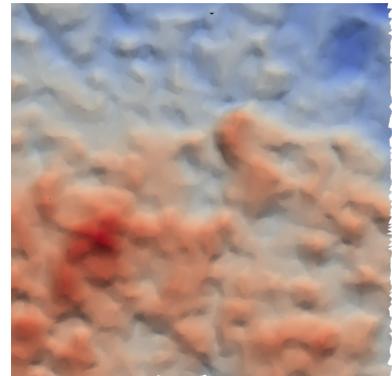
## 5. Versuch



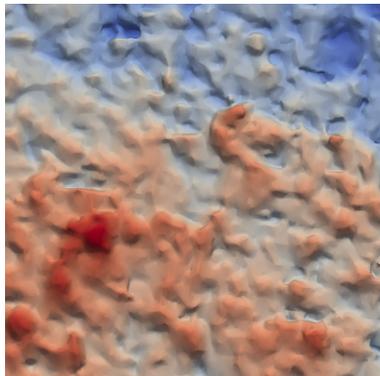
(a) räumliche Vernetzung der sanft gefilterten Tiefenkarten



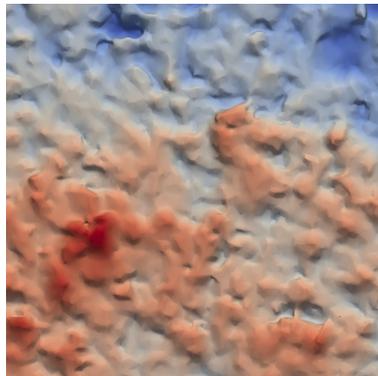
(b) räumliche Vernetzung der moderat gefilterten Tiefenkarten



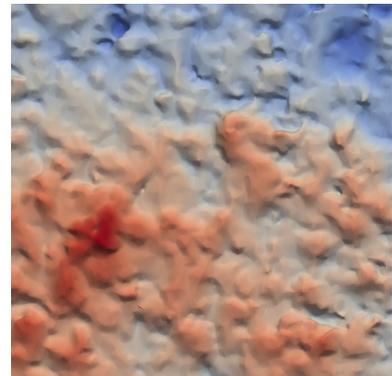
(c) räumliche Vernetzung der stark gefilterten Tiefenkarten



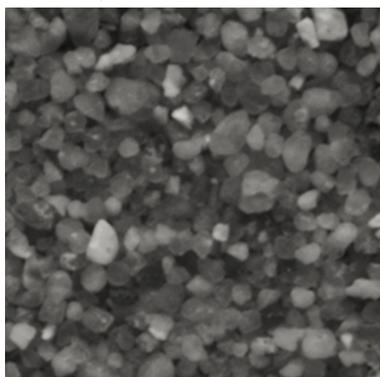
(d) räumliche Vernetzung der sanft gefilterten Punktwolke



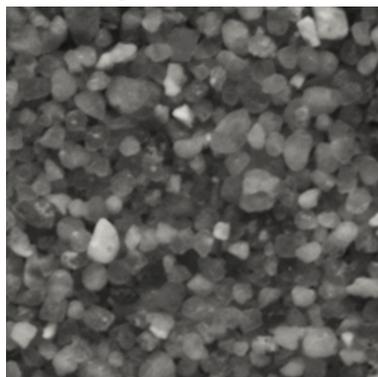
(e) räumliche Vernetzung der moderat gefilterten Punktwolke



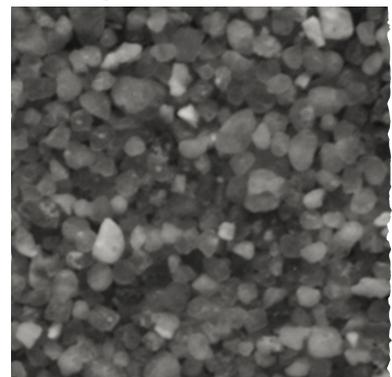
(f) räumliche Vernetzung der stark gefilterten Punktwolke



(g) Orthophoto der sanft gefilterten Punktwolke



(h) Orthophoto der moderat gefilterten Punktwolke



(i) Orthophoto der stark gefilterten Punktwolke

Abbildung 5.15.: Räumliche Vernetzungen unterschiedlich gefilterter Tiefenkarten und Punktwolken. Für einen augenscheinlichen Vergleich sind die Orthophotos beigegeben.

## 5. Versuch

entlang von Gradienten verdichtet und dafür in anderen Bereichen etwas lichter ist, kommt es vor, dass bei der Rasterung keine Höheninformationen zur Verfügung stehen. Die Höhenwerte dieser Zellen sind sodann durch Interpolation zu ermitteln. Als weiteres Ausgabeprodukt stellt *Metashape* Orthophotos bereit, die beispielsweise zur Texturierung von Vernetzungen Einsatz finden.

### 5.4. Zusammenfassung

Die praktischen Versuche fanden in einem kurzen, mit beweglicher Sohle und elliptischen Pfeiler ausgestatteten Gerinne statt. In dem sehr kompakten Zubringersystem herrschten komplizierte Strömungsvorgänge, die komplexe Strömungsstrukturen und feinste Luftbläschen in den Versuchsstand eintrugen. Diese wirkten bis in den Messbereich hinein. Die getroffenen Gegenmaßnahmen federten die Auswirkungen lediglich ein wenig ab. Da die Versuche hauptsächlich der Demonstration der entwickelten Messtechnik dienten und ein alternatives Gerinne nicht zur Verfügung stand, musste die ungünstige Zuströmsituation so hingenommen werden. In das Gerinne wurden unterschiedliche Einbauten eingesetzt, deren Aufgabe es war, lokale Sohlveränderungen hervorzurufen, die dann mit dem entwickelten Messsystem aufgemessen wurden. Das Messsystem umfasste vier Aufnahmeeinheiten, die auf den Nachlaufbereich des Bauwerks gerichtet waren und dort die Sohlveränderungen aufzeichneten.

Zur Vorbereitung musste für jede Aufnahmeeinheit eine Luftkalibrierung, eine Ausrichtung der Zentren, die die Koinzidenz von Eintrittspupille und Vorsatzlinsenzentrum bis auf wenige zehntel Millimeter herstellt, und eine Unterwasserkalibrierung erfolgen. Im Anschluss daran konnte mit den Unterwasseraufnahmen zu einem Versuch begonnen werden. In der nachfolgenden Unterwasserrekonstruktion wurden die Unterwasseraufnahmen schrittweise aufbereitet. Ein mehrstufiges Verfahren entfernte aus den Unterwasseraufnahmen zuerst die Objektivverzeichnungen und dann die abstandsabhängigen Unterwasserverzeichnungen. Nach Abschluss der Aufbereitung war es möglich ein Einmedien-Verfahren korrekterweise auf sie anzuwenden.

Die eingesetzte Messtechnik lieferte hochaufgelöste und scharfe Bilder der Sohle, aus denen mit dem vorgestellten Vorgehen zur Unterwasserrekonstruktion zunächst hochaufgelöste Punktwolken abgeleitet wurden. Im weiteren Fortgang konnten daraus Vernetzungen, digitale Gelände-Modelle und Orthophotos gewonnen werden.

## 6. Datenveredelung

Die Unterwasseraufnahmen und die daraus rekonstruierte Sohltopographie liefern ein digitales Abbild der Sohle. Um daraus einen wasserbaulichen Mehrwert zu generieren, stellt dieses Kapitel zwei Veredelungsmöglichkeiten vor. Zum einen die Bestimmung der mittleren Sohlage und der Rauheiten und zum anderen die Detektion von Einzelkornbewegungen. Mit den skizzierten Verfahren lassen sich wichtige Prozesse und Kenngrößen aus den Bild- und Vermessungsdaten herausarbeiten.

### 6.1. Mittlere Sohlage und Rauheiten

Aus der hochaufgelösten Punktwolke können die mittlere Sohlage und Rauheitsinformationen extrahiert werden. Da beide aneinander gekoppelt sind, werden sie in diesem Abschnitt gemeinsam betrachtet. Zur Extraktion wird die Punktwolke in eine mittlere und eine trendbereinigte Sohle, die als Differenz zwischen der mittleren und der tatsächlich vermessenen Sohlage definiert ist, zerlegt (vgl. Smart et al., 2002).

Bei der Beschreibung von Sohlrauheiten wird oftmals zwischen Korn- und Formrauheit differenziert. Die Kornrauheit beschreibt die Oberflächenrauheit der Sohle, die durch die einzelnen Körner entsteht und durch die trendbereinigte Sohle beschrieben werden kann. Zur Bestimmung der Formrauheit, die die Rauheitseffekte der Sohltopographie abbildet, muss die mittlere Sohlage herangezogen werden. Der Rückschluss von der mittleren Sohlage auf die Formrauheit fällt jedoch schwer, da die Modelle zur Beschreibung der Formrauheit für Sandsohlen mit ihren Riffel- und Dünenstrukturen konzipiert wurden (van Rijn, 1993).

#### 6.1.1. Trendbereinigte Sohle

Smart et al. (2002) extrahierten die Rauheitshöhen aus hochaufgelösten digitalen Geländemodellen von Sohlen. Hierzu wurde das Sohl-DGM mit einem Grobraster der Maschenweite  $1,25 \cdot d_{90}$  überzogen und anschließend für jeden Rasterpunkt eine die mittlere Sohlhöhe errechnet, indem die Höhen des digitalen Geländemodells in einem Umkreis von  $2,5 \cdot d_{90}$  um die Grobrasterpunkte herum gemittelt wurden. Eine bikubische-Spline-Interpolation stellte die

## 6. Datenveredelung

Zwischenwerte, die für die punktweise Differenzbildung mit dem digitalen Geländemodell notwendig waren, bereit. Aus der Differenz von mittlerer Sohlage und Sohl-DGM entstand die trendbereinigte Sohle. Über die Standardabweichung der trendbereinigten Sohlhöhen konnte daraus eine Rauheitsinformation gewonnen werden (vgl. Smart et al., 2002).

Aberle (2000) identifiziert die Standardabweichung der trendbereinigten Sohlage als Parameter zur Beschreibung der Strukturiertheit. Er zeigte, dass die in Widerstands- oder Potenzgesetze eingearbeitete Standardabweichung dem Korndurchmesser als Rauheitsmaß überlegen ist.

Aufgrund der unterschiedlichen Eingangsdaten weicht das in dieser Arbeit angewandte Verfahren geringfügig von dem von Smart et al. (2002) vorgestellten Verfahren ab. Smart et al. (2002) nutzen ein gleichmäßig gerastertes DGM. Das hier vorgestellte Vorgehen nutzt hingegen die hochaufgelösten Punktwolken, deren Punktdichte räumlich variiert. Die Punktwolke wurde bewusst nicht in ein digitales Geländemodell überführt, da senkrechte Abschnitte und Überhänge aus den Daten entfernt worden wären und dies eine Glättung der Sohltopographie bewirkt hätte. Zur Extraktion der mittleren Sohlage wurde die hochaufgelöste Punktwolke in einem ersten Schritt mit einem Filter um den Faktor Hundert ausgedünnt und anschließend mit einem *moving-least-square*-Algorithmus geglättet. Der Glättungsalgorithmus verlangt einen Suchradius, der den Wirkungsbereich definiert. Ein zu klein gewählter Suchradius lässt die Glättung unwirksam werden, wohingegen ein zu groß gewählter Suchradius unter Umständen den Änderungen der Sohle nicht mehr folgen kann. Mit einem Suchradius von  $2,5 \cdot d_{90}$ , der in Anlehnung an Smart et al. (2002) festgesetzt wurde, zeichneten sich die einzelnen Körner der Sohle am deutlichsten ab, siehe Abbildung 6.1f. Bereits eine Erweiterung des Suchradiuses auf  $4,5 \cdot d_{90}$  ließ die Grenzen der einzelnen Körner mehr ineinander verschwimmen, siehe 6.1c. Zur Bildung der Differenz kam der M3C2-Algorithmus zum Einsatz (Lague et al., 2013). Dieser errechnete den vertikalen Abstand zwischen den beiden Punktwolken. Abbildung 6.2a zeigt einen Ausschnitt einer Sohle in 3D eingefärbt mit den Oberflächentexturen. In Abbildung 6.2b ist nochmals der gleiche Ausschnitt zu sehen, diesmal aber mit den Höheninformationen des trendbereinigten Sohlniveaus eingefärbt. Die exponiert gelegenen Sedimentkörner zeichnen sich auf dem trendbereinigten Sohlniveau klar ab.

### 6.1.2. Zeitliche Entwicklung der trendbereinigten Sohle

Aus den Messdaten kann die zeitliche Entwicklung der trendbereinigten Sohle herausgearbeitet werden. Technisch ist die zeitliche Auflösung durch die Bildwiederholrate der Kamera limitiert. Bei den eingesetzten Kameras sind das 73 Bilder pro Sekunde. Bei mehrstündigen Versuchen würden derart hohe Bildraten enorme Speicherressourcen beanspruchen. Das in dieser Arbeit verwendete Mehrkamerasystem produziert bei Ausschöpfung der maximalen Bildrate Rohdaten in einem Umfang von etwa  $1,2 \text{ GB s}^{-1}$ . Pro Stunde entspricht das 4,3 TB, zu deren Spei-

## 6. Datenveredelung

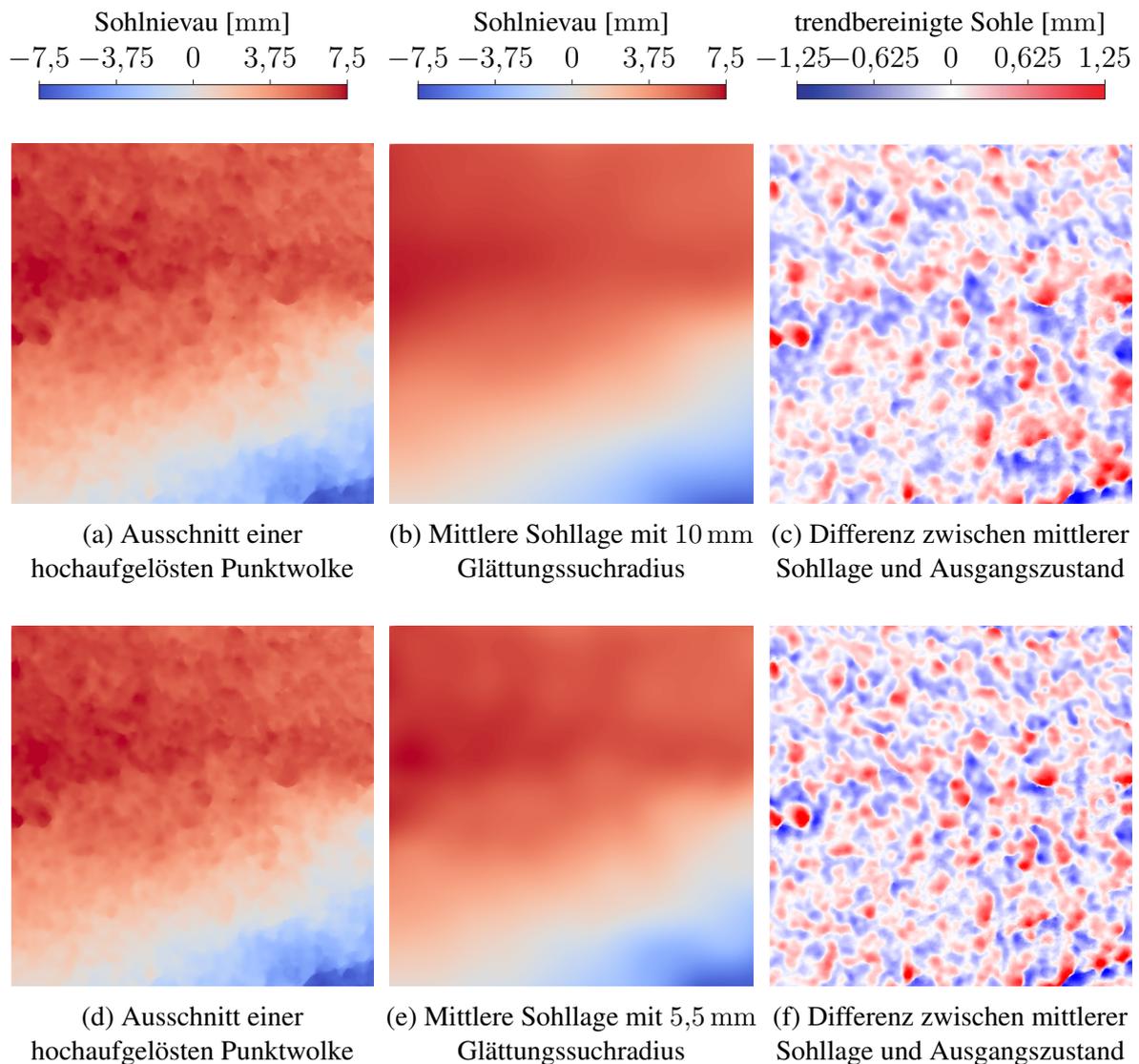


Abbildung 6.1.: Verfahrensschritte zur Extraktion der trendbereinigten Sohle am Beispiel eines  $25 \times 25$  mm großen Ausschnittes einer hochaufgelösten Punktwolke eines Mehrkornversuchs. Links dargestellt, die hochaufgelöste Punktwolke der Unterwasserrekonstruktion. In der Mitte dargestellt, die daraus abgeleiteten mittleren Sohlagen für zwei unterschiedliche Glättungsradien. Rechts dargestellt, die trendbereinigte Sohle, die sich aus der Differenz zwischen hochaufgelöster Punktwolke und mittlerer Sohlage ergibt.

cherung und Prozessierung Höchstleistungsrechner notwendig wären. Die sedimentologischen Umlagerungs- und Sortierprozesse laufen vergleichsweise langsam ab, so dass die Aufnahme-rate deutlich gesenkt und dennoch die Prozesse sehr fein aufgelöst werden können. In den 12-stündigen Versuchen, die im Rahmen dieser Arbeit stattfanden, fertigte jede Kamera über die Gesamtlaufzeit hinweg pro Minute eine Aufnahme an.

## 6. Datenveredelung

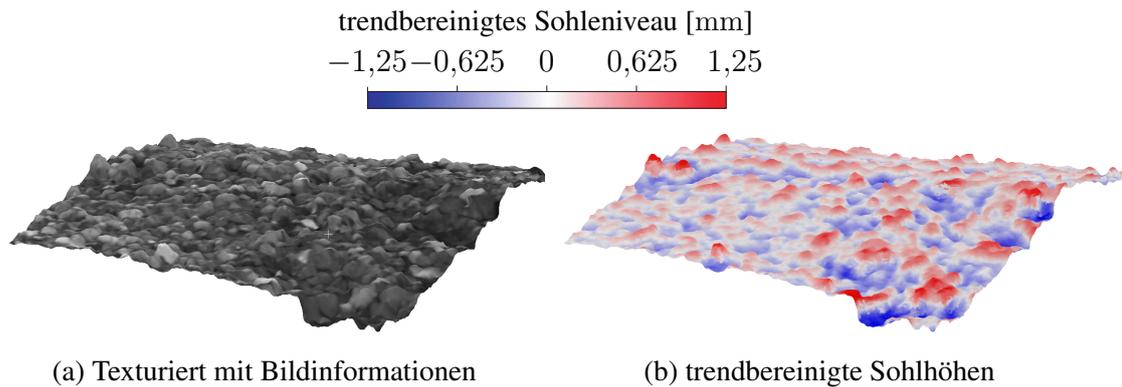


Abbildung 6.2.: Ausschnitt (50 mm × 50 mm) einer hochauflösten Punktwolke.

Die Abbildung 6.3 zeigt exemplarisch drei trendbereinigte Sohlzustände: den Initialzustand, den Zustand kurz nach Anfahren des Versuchsstandes und den Endzustand. Ergänzend sind Ausschnitte der Unterwasserbilder beigegeben, um einen augenscheinlichen Vergleich vornehmen zu können. Die trendbereinigten Sohlhöhen des initialen Zustandes sind vergleichsweise moderat und relativ homogen. Bereits kurz nach dem Anfahren des Versuchsstandes wuchsen die trendbereinigten Sohlhöhen deutlich an, vorrangig im turbulenten Nachlaufbereich des Pfeilers. Durch das Anfahren wurden die Feianteile ausgewaschen und das gröbere Material hinter dem Pfeiler großflächig freigelegt. Im Endzustand lässt sich das Ergebnis der Sortierprozesse erkennen. Ausgehend von den Seiten des elliptischen Pfeilers entwickelten sich in Strömungsrichtung zwei grob abgeplasterte Bereiche. Links, mittig und rechts davon befinden sich Bereiche mit feinerem Sohlmaterial.

### 6.1.3. Räumliche und zeitliche Entwicklung der Kornrauheit

Um aus den trendbereinigten Sohlhöhen die räumliche und zeitliche Entwicklung der Kornrauheit ableiten zu können, sind diese nochmals aufbereitet worden. Die hohe Informationsdichte der fein aufgelösten Punktwolken ermöglichte, teilgebietsweise die Standardabweichung der trendbereinigten Sohlhöhen zu erheben. Die Auswertung erfolgte über einen Schiebefensteralgorithmus. Das Auswertefenster maß  $20 \times 20$  mm und wurde stets um einen Zentimeter versetzt, so dass sich die Teilgebiete überschneiden. Für jede Fensterposition wurde eine lokale Standardabweichung der trendbereinigten Sohlhöhen berechnet, die nach Abschluss des Vorgangs in einem 10 mm Raster für das Gesamtgebiet vorlagen. Die Abbildung 6.4 zeigt exemplarisch vier Zustände von trendbereinigten Sohlhöhen und die daraus abgeleiteten lokalen Standardabweichungen. Die vollständigen Zeitreihen finden sich im Anhang D.1. Dort wird ersichtlich, dass es beim Anfahren des mit Einkornmaterial betriebenen Versuchs kurzzeitig zu einem erhöhten Abfluss gekommen sein muss, der die Feianteile auswusch, siehe Abbildung

## 6. Datenveredelung

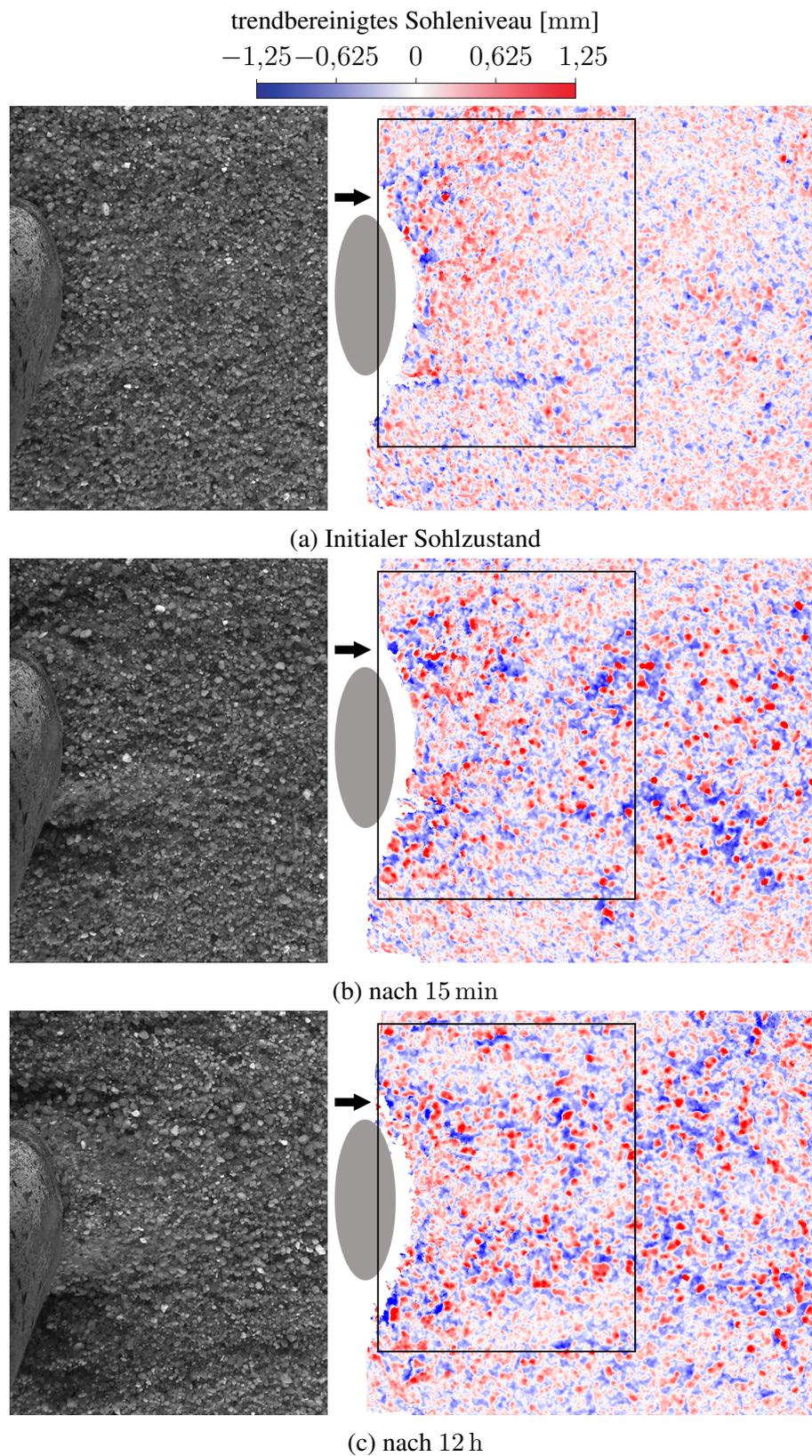


Abbildung 6.3.: Zeitliche Entwicklung des trendbereinigten Sohleniveaus [mm] eines Pfeilerkolkversuchs mit Mehrkornsohle. Die Pfeilergeometrie ist grau schraffiert und der Pfeil deutet die vorherrschende Fließrichtung an. Linker Hand sind die Ausschnitte der zugehörigen Unterwasseraufnahmen dargestellt.

## 6. Datenveredelung

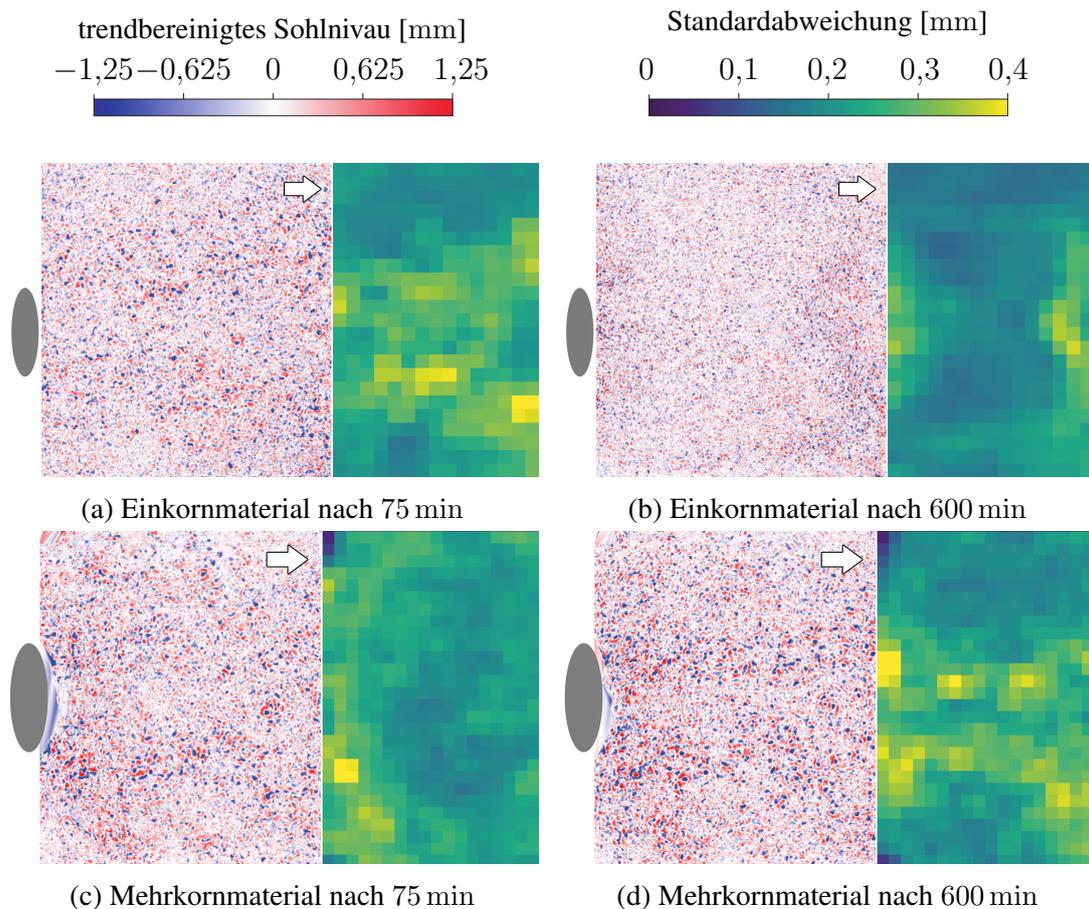


Abbildung 6.4.: Entwicklung der trendbereinigten Sohlhöhen im Nachlaufbereich des elliptischen Pfeilers. In den Teilabbildungen sind linker Hand die trendbereinigten Sohlniveaus und rechter Hand die lokalen Standardabweichungen dargestellt. Der Pfeil deutet die vorherrschende Hauptströmungsrichtung an.

6.4a. Die anfänglichen Auswaschungen sind in den trendbereinigten Sohlhöhen nach zweieinhalb Stunden, siehe Abbildung D.7b, nur noch schwer auszumachen. In den lokalen Standardabweichungen sind sie aber noch gut zu erkennen, siehe der Abbildung D.7 im Anhang D.1.

Ogleich die ersten Ergebnisse hier zeigen, dass die Standardabweichung und die Oberflächenrauheit gut zusammenpassen, drängt sich die Frage auf, wie dies im Hinblick auf die numerische Modellierung nutzbar gemacht werden könnte. Numerische Simulationen, die für große Gebiete die einzelnen Partikel direkt auflösen, sind noch in weiter Ferner. Die Interaktionen zwischen Wasser und Sedimentpartikeln erfordern ein sehr feines Berechnungsgitter und einen freien Berechnungszeitschritt. Beides führt dazu, dass die Simulationsdauer sehr schnell extrem anwächst. Aller Voraussicht nach wird es noch einige Zeit dauern, bis die bewährten sohlmorphologischen Modelle ersetzt werden können. So lange sind noch die charakteristischen Korn-durchmesser, wie beispielsweise  $d_m$  oder  $d_{90}$ , zu bestimmen.

## 6. Datenveredelung

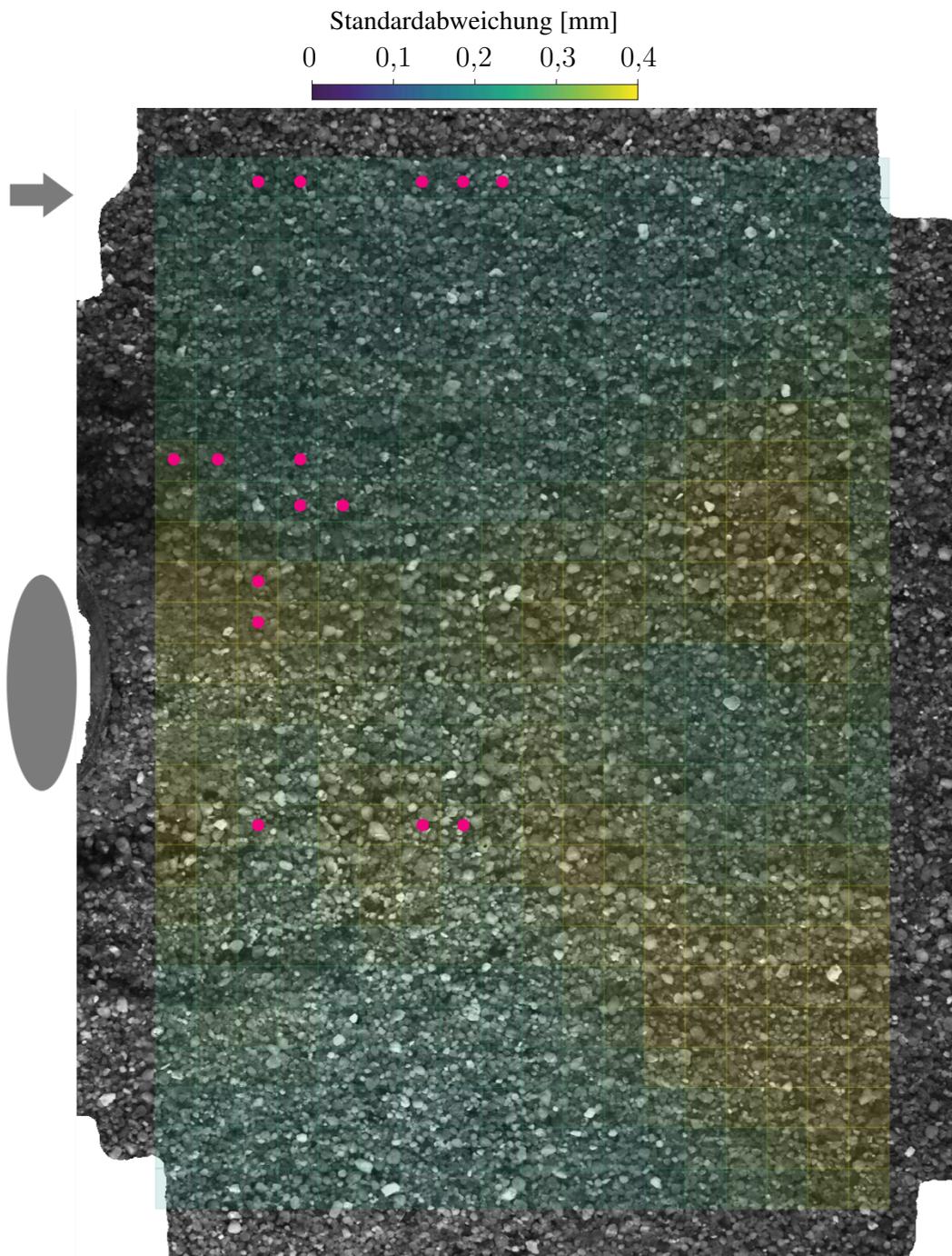


Abbildung 6.5.: Orthophoto des Versuchs mit elliptischen Pfeiler und Mehrkornsohle im Endzustand. Überlagert mit der teilgebietsweisen Standardabweichung der trendbereinigten Sohlfläche. Die magentafarbenen Punkte markieren die mit *BASEGRAIN* ausgewerteten Teilgebiete.

## 6. Datenveredelung

### 6.1.4. BASEGRAIN-Sieblinien

*BASEGRAIN* kann aus einem Bild die Kornverteilungen der dargestellten Kiessohle ableiten. Das an der ETH Zürich entwickelte Programm digitalisiert die Linienzahlanalyse von Fehr (1987), die der Analyse von grobem Geschiebematerial dient. Für eine Linienzahlanalyse ist eine Schnur zu spannen, entlang derer die mittleren Achsen der Steine, die einen Durchmesser größer 1 bis 2 cm haben, aufgenommen werden. Daraus lässt sich über das von Fehr (1987) vorgestellte Verfahren die Kornverteilung berechnen. Die bildverarbeitenden Prozesse von *BASEGRAIN* übernehmen das Aufmaß. Sie legen die einzelnen Steine frei und approximieren sie durch Ersatzellipsoide. Die kürzeren Achsen werden in das Linienzahlverfahren gegeben, um daraus die Kornverteilung zu bestimmen.

Optimalerweise sind die Bilder der Kiessohlen senkrecht aufgenommen und frei von Schlag-  
schatten. Die gleichmäßige Beleuchtung des Versuchsstandes unterband Schlagschatten. Da die  
Aufnahmeeinheiten schräg eingebaut waren, wurde ein Orthophoto des Endzustandes, von dem  
mit elliptischen Pfeiler und Mehrkornsohle stattgefundenen Versuch, aus *Metashape* exportiert,  
siehe Abbildung 6.5. Anschließend wurde die teilgebietsweise Standardabweichung berechnet.  
Diesmal mit einer Schiebefenstergröße von  $40 \times 40$  mm und einem Versatz von 10 mm, siehe  
Abbildung 6.5. Zudem speicherte der Schiebefensteralgorithmus die einzelnen Teilgebietsbilder  
heraus, so dass diese in *BASEGRAIN* weiterverarbeitet werden konnten.

Nachdem *BASEGRAIN* zur Analyse von groben Kiessohlen konzipiert ist, konnten für die ver-  
gleichsweise feinen Sohlmaterialien, die im Rahmen dieser Arbeit Verwendung fanden, keine  
quantitativ belastbaren Aussagen getroffen werden. Um aus *BASEGRAIN* überhaupt Ergebnisse  
zu bekommen, war es notwendig die Angaben zur Pixelabmessung zehnfach zu überhöhen, von  
 $0,1 \text{ Pixel mm}^{-1}$  auf  $1 \text{ Pixel mm}^{-1}$ . Dies hängt mit der unteren Grenze des Steindurchmessers,  
die mit 1 bis 2 cm angegeben ist, zusammen. Die Freilegung der einzelnen Körner geschieht  
weitgehend automatisch (Detert und Weitbrecht, 2012). Im Rahmen dieser Arbeit wurden led-  
iglich der *block-size gray threshold* auf 8 reduziert und je nach Helligkeit des Bildes der *factor  
gray threshold* zwischen 0,75 und 0,85 variiert. Alle anderen Parameter behielten ihre Stan-  
dardwerte. Beim Laden wird das Bild automatisch mit einer Beschnittmaske versehen, die bei  
den kleinen Teilgebietsbildern stark ins Gewicht fiel, siehe Abbildungen 6.6a bis 6.6c. Wird die  
Beschnittmaske auf den kompletten Bildbereich aufgezogen, verschwindet die graphische Aus-  
gabe. Diese ist jedoch essentiell, um prüfen zu können, ob die einzelnen Steine korrekt erkannt  
wurden. Im Bedarfsfall sind zu groß identifizierte Konglomerate aufzutrennen oder fragmentier-  
te Sedimentkörner zu einem Ganzen zusammenzufügen. Exemplarisch sind in den Abbildungen  
6.6d bis 6.6f die freigelegten Gesteinskörner dargestellt.

Um den Zusammenhang zwischen der Standardabweichung und den charakteristischen Korn-  
durchmessern besser zu verstehen, wurden die Teilgebiete, die in Abbildung 6.5 mit einem

## 6. Datenveredelung

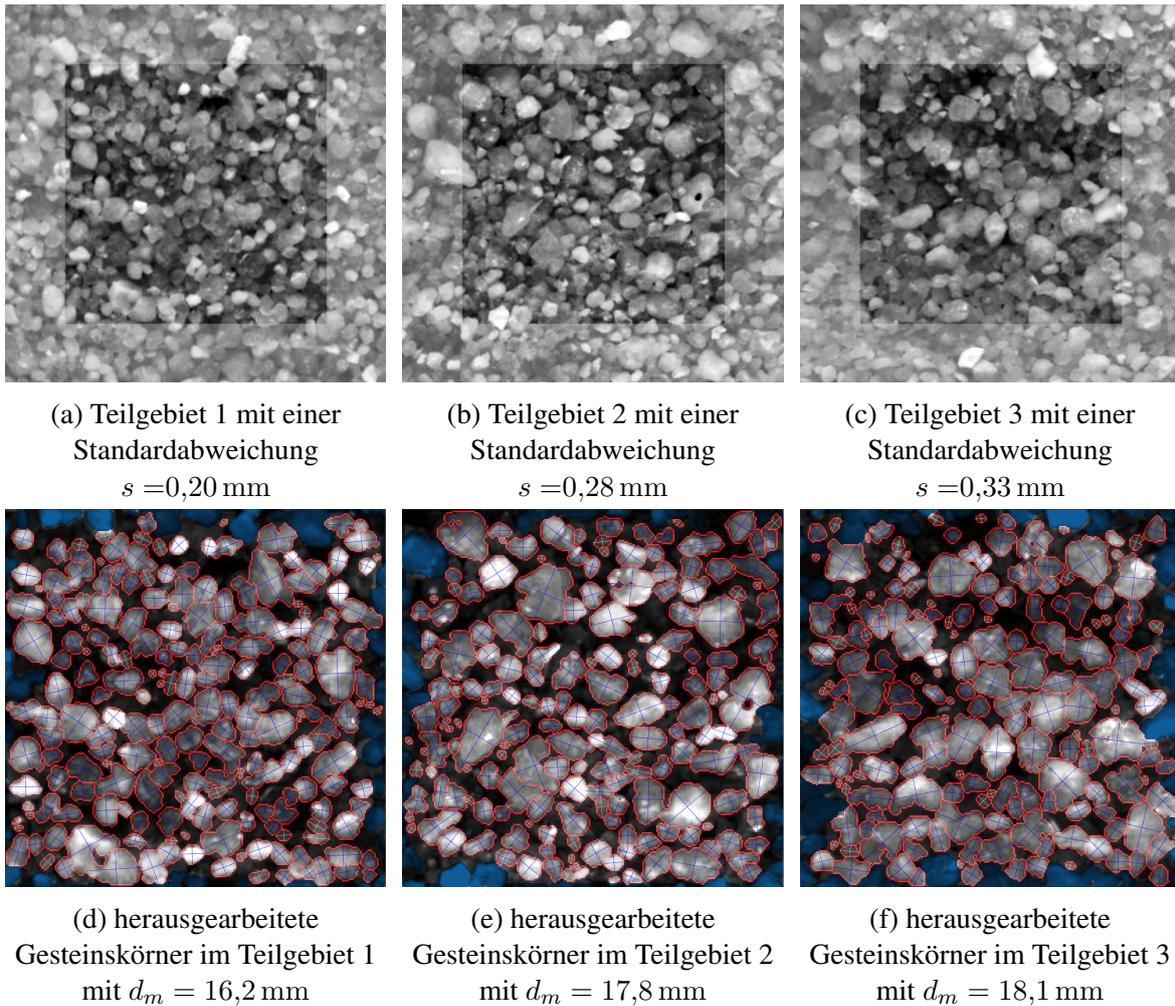


Abbildung 6.6.: Von *BASEGRAIN* herausgearbeitete Sedimentkörner für Bereiche mit unterschiedlicher Oberflächenrauheit, von links nach rechts mit zunehmender Rauheit.

Punkt markiert sind, händisch ausgewertet und in Abbildung 6.7a gegen die Standardabweichung aufgetragen. Ergänzt durch die linearen Regressionen wird der Trend, dass mit zunehmender Standardabweichung eine Vergrößerung des Korndurchmessers stattfindet, erkennbar, aber auch dass sie einer relativ großen Streuung unterliegen. In Abbildung 6.7b sind die von *BASEGRAIN* ermittelten Siebkurven dargestellt. Auch hier zeigt sich das gleiche Verhalten, mit größer werdender Standardabweichung findet eine Vergrößerung der Kornverteilung statt. Quantitativ sind die Ergebnisse jedoch nicht belastbar, da die ermittelten Größen der Sedimentkörner durch die Skalierung verzerrt ist. Die genauen Auswirkungen der Skalierung wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter untersucht, da zur Absicherung ergänzende Versuche notwendig gewesen wären.

Die hier vorgestellten Ergebnisse zeigen das Potential, aus Bilddaten Rauheiten in einer bislang noch nicht erreichten räumlichen Auflösung zu erheben. Mit weiteren Versuchen, die zur Kali-

## 6. Datenveredelung

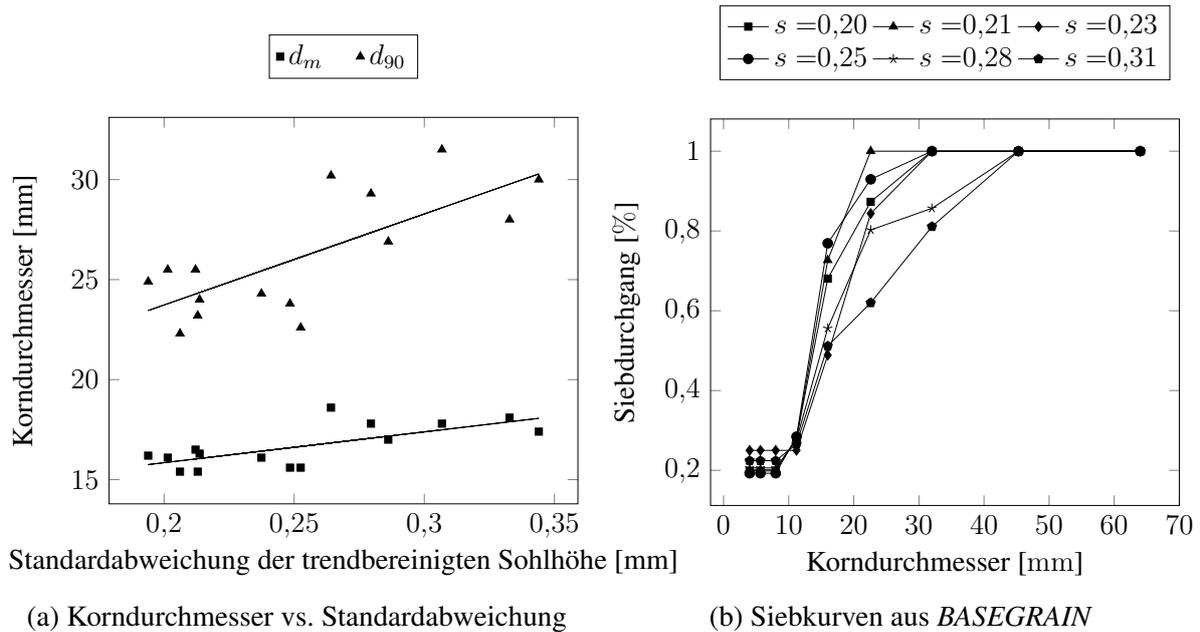


Abbildung 6.7.: Ergebnisse aus *BASEGRAIN*

brierung und Verfeinerung des Vorgehens notwendig sind, kann in zukünftigen Anwendungen ein Qualitätssprung bei der Erfassung von Rauheiten gelingen.

### 6.1.5. Mittlere Sohlage

Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle erwähnt, dass aus den Zeitreihen der mittleren Sohlagen, siehe Anhang D.2, die zeitlichen Veränderungen an der Sohle, die Neigungen sowie die Krümmung herausgearbeitet werden können, siehe Abbildung 6.8. Auch volumetrische Veränderungen, maximale Auflandungshöhen und Kolkiefen können aus den mittleren Sohlagen errechnet werden (Rapp et al., 2012, Liepert et al., 2016). Darüber hinaus kann aus den mittleren Sohlagen ein numerisches Modell aufgebaut werden, um beispielsweise das zugehörige Geschwindigkeits- oder Druckfeld zu studieren. Da diese Methoden jedoch bereits zum Standardrepertoire gehören, werden sie an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt.

## 6. Datenveredelung

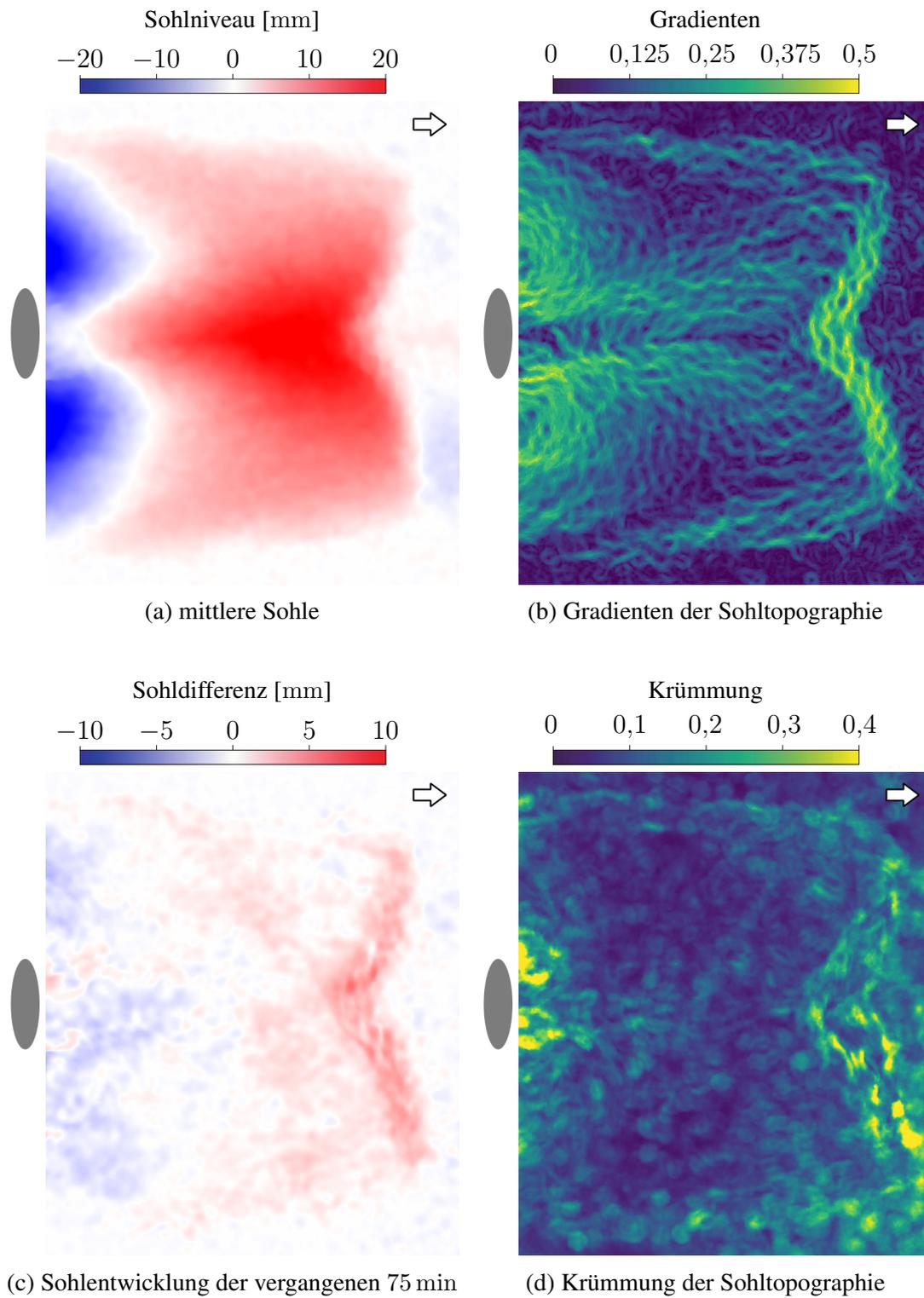


Abbildung 6.8.: Ergebnisse des Einkornversuchs für den Zeitpunkt  $t = 600$  min

### 6.2. Einzelkornbewegungen

Versuchsbegleitend wurden testweise einige kurze Sequenzen mit nur einer Kamera aufgezeichnet, um zu sehen, ob darin die Bewegungen der einzelnen Körner ausgemacht werden können. Obwohl die Aufnahmesoftware des Herstellers nur ca. 20 bis 30 Bilder pro Sekunde aufzeichnete, dies liegt deutlich unter der technisch möglichen Aufnahmerate von 73 Bilder pro Sekunde, konnten die Einzelkornbewegungen durch Inaugenscheinnahme klar identifiziert und nachverfolgt werden. Da die Aufnahmesoftware des Herstellers außer Stande ist, synchron mehrere Kameras zu verarbeiten, musste auf die eigenentwickelte Aufnahmesoftware, die zur Erfassung der synchronisierten Unterwasseraufnahmen eingesetzt wurde, zurückgegriffen werden. Diese zeichnete mit einem verbesserten Speicherkonzept 25 Bilder pro Sekunde und Aufnahmeeinheit synchron auf. Mit einer leistungsoptimierten C++ Implementierung ließe sich auch die technisch mögliche Bildwiederholrate erreichen.

Differenzbildverfahren arbeiten die sich verändernden Bildbereiche einer Bildfolge heraus, aus denen auch die Bewegungen der einzelnen Sedimentkörner hervorgehen (Radice et al., 2006, Pflieger, 2010, Shim und Duan, 2017). Die Differenz von unveränderten Bereichen sollte Null sein. Durch Sensorrauschen und Schwankungen in der Belichtung ergeben sich minimal Abweichungen. Der Differenzwert von sich verändernden Bereichen hängt von der Art der Änderung ab. Es wird bestimmt durch den Wechsel von hellen zum dunklen Bereich oder umgekehrt. Dies spielt auch beim Einsatz von natürlichem Sohlmaterial eine Rolle, da folgende verschiedene Fälle auftreten können: ein dunkles Sedimentkorn bewegt sich über eine helle Oberfläche oder umgekehrt, der Hintergrund verändert bzw. gleicht sich an und durch die Bewegung des Kornes ändert sich dessen Form, dargestellte Größe und Farbe. Die unterschiedlichen Erscheinungsformen führen dazu, dass zur Bestimmung der Bewegungsrichtung eine Fallunterscheidung getroffen werden muss (Pflieger, 2010).

#### 6.2.1. Bewegungen aus synthetischen Bildern

Zur Vermeidung komplizierter Fallunterscheidungen wurde in einem ersten Auswerteansatz versucht, die trendbereinigte Sohlhöhe nutzbringend einzusetzen, da sie exponiert gelegene Sedimentkörner klar herausarbeitet, siehe Abbildung 6.2b. Über synthetische Bilder der räumlich vernetzten Punktwolke, die durch die trendbereinigte Sohlhöhe eingefärbt ist, sollte ein Differenzbildverfahren die sich verändernden Bereiche herausarbeiten. In Bewegung befindliche Sedimentkörner sind überwiegend exponiert gelegen und sollten aufgrund dessen in den positiven trendbereinigten Sohlhöhen klar zu erkennen sein. Über Differenzbildverfahren könnten die Partikel herausgearbeitet und zur Weiterverarbeitung an eine PTV-Software übergeben werden, so die Idee.

## 6. Datenveredelung

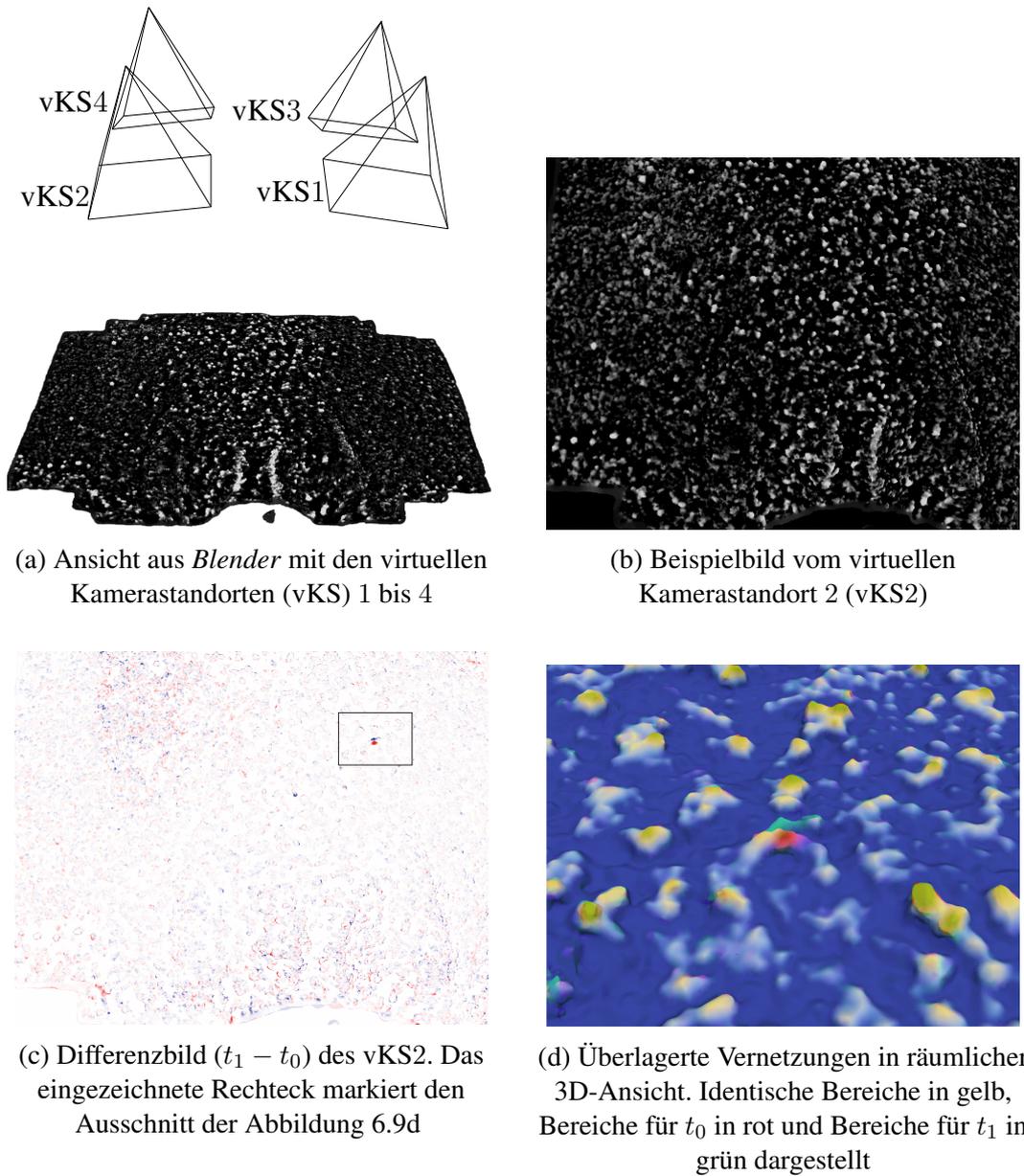


Abbildung 6.9.: Synthetische Bilder

## 6. Datenveredelung

Zur Realisierung wurden die Programme *CloudCompare* und *Blender* eingesetzt. In *CloudCompare* wurden die trendbereinigten Sohlhöhen erzeugt, auf die räumlich vernetzte Punktwolken projiziert und nach *Blender* exportiert wurden. In *Blender* wurden von diesen für unterschiedliche virtuelle Kamerastandorte synthetische Bilder verschiedener Zeitpunkte gerendert, siehe Abbildung 6.9. Die daraus berechneten Differenzbilder zeigten ein erhebliches Rauschen und gaben nur die Bewegungen von vergleichsweise großen Sedimentkörnern zweifelsfrei zu erkennen, siehe Abbildung 6.9c. In der überlagerten Darstellung zweier räumlich vernetzter Zustände in Abbildung 6.9d ist die Bewegung eines großen Kornes und das Rauschen, das durch die bunten Ränder gekennzeichnet ist, ersichtlich. Viele kleine Bewegungen oder Bewegungen kleiner Sedimentkörner lassen sich anhand der vernetzten Punktwolken nicht nachvollziehen, deshalb wurde dieser Ansatz nicht weiter verfolgt.

### 6.2.2. Bewegung aus entzerrten Bildaufnahmen

In einem zweiten Anlauf zur Bestimmung der Einzelkornbewegungen wurden die entzerrten Bilder eines Kamerastandorts direkt ausgewertet. Bei Inaugenscheinnahme der Bildsequenz sind die Bewegungen der einzelnen Körner klar auszumachen. Das im Folgenden skizzierten Auswertevorgehen soll diese Bewegungen aus den Bilddaten herausarbeiten. Die eingangs angesprochenen Fallunterscheidungen, die bei konventionellen Differenzbildverfahren zu treffen sind, können durch eine Kombination von Vordergrund-Hintergrund-Trennung und Bestimmung des optischen Flusses umgangen werden.

Verfahren zur Vordergrund-Hintergrund-Trennung extrahieren den Vordergrund, indem sie für jedes Pixel aus der Bildsequenz ein Hintergrundmodell erzeugen. Auf dieser Grundlage kann die Bewertung, ob ein Pixel zum Hintergrund gehört oder nicht, vorgenommen werden. Die Beschreibung der Hintergrundmodelle geschieht über statistische Modelle, die für jeden Pixel

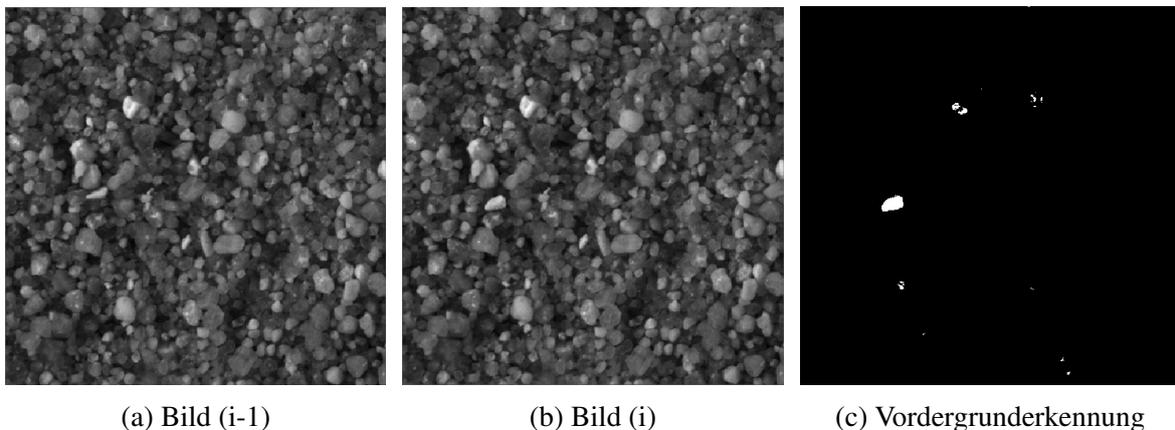


Abbildung 6.10.: Vordergrunderkennung mittels *BackgroundSubtractorMOG2*

## 6. Datenveredelung

eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des Intensitätswerts erzeugen. Üblicherweise wird mit jedem neuen Bild das Hintergrundmodell aktualisiert, indem das neue Bild in die Berechnung mit aufgenommen wird und dort die höchste Gewichtung erhält, die Gewichtungen der älteren Aufnahmen abgeschwächt und zu weit in der Vergangenheit liegende Aufnahmen aus der Modellbildung ganz ausgeschlossen werden. Damit ist das Hintergrundmodell keinesfalls statisch, sondern dynamisch und passt sich Veränderungen an (vgl. Zivkovic, 2004, Zivkovic und van der Heijden, 2006). Ein robuster und zugleich effizienter Algorithmus zur Hintergrundsubtraktion ist der in *OpenCV* enthaltene *BackgroundSubtractorMOG2*, der auf den Ideen von Zivkovic und van der Heijden (2006) gründet. Der *BackgroundSubtractorMOG2* funktionierte auch im Zusammenspiel mit dem eingesetzten natürlichen Sohlmaterial und arbeitete die Einzelkornbewegungen aus den Bilddaten zuverlässig heraus, siehe Abbildung 6.10. Die Gestalt, der mit Hilfe der Vordergrunderkennung herausgearbeiteten Bereiche, dargestellt in Abbildung 6.10c, wurde von der Korngröße und der Bewegung geprägt. Große Bewegungen von großen Steinen führten zu Bereichen, die das Sedimentkorn vollständig umschlossen. Kleinere Bewegungen von großen bis mittleren Körnern mündeten in zwei kleineren sich gegenüberliegenden Flächen, die das Sedimentkorn einrahmten.

Zur Lagebestimmung der Steine wurden die zusammenhängenden Bereiche der Vordergrunderkennung ermittelt, siehe Abbildung 6.11a, und deren Fläche sowie Schwerpunkte berechnet. Die Bereiche, denen große Bewegungen großer Steine zugeordnet werden konnte, besaßen eine Fläche über 250 Pixel. In diesen Fällen beschreibt der Flächenschwerpunkt das Zentrum des Sedimentkorns hinreichend genau. Für Bereiche mit einer Fläche von 20 Pixel bis 250 Pixel ist ein Zwischenschritt erforderlich, da nahe beieinander liegende Bereiche paarweise zu betrachten sind. Mit einer morphologischen Erweiterung wurden alle Bereiche gleichmäßig ausgeweitet, so dass benachbarte Bereiche miteinander verwuchsen, siehe Abbildung 6.11b. Für

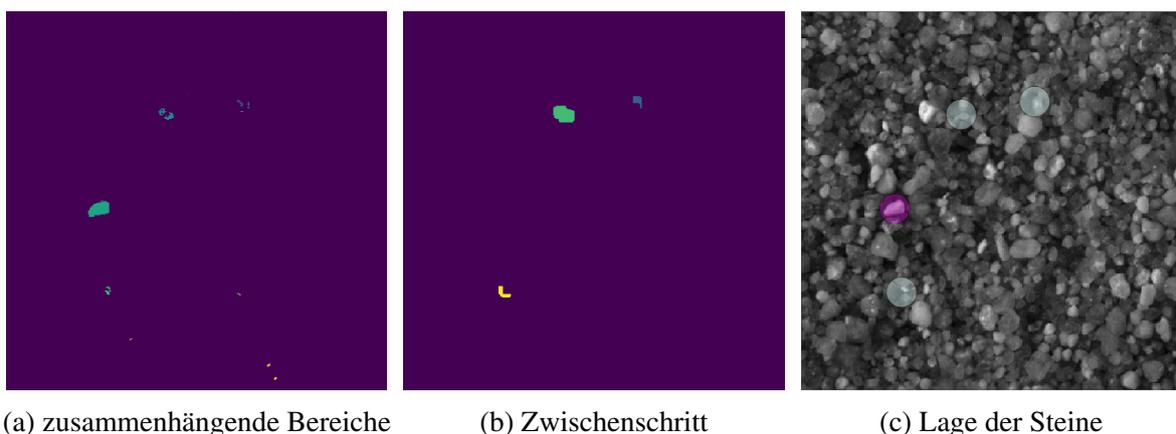


Abbildung 6.11.: Lagebestimmung der bewegten Sedimentkörner. In Teilabbildung 6.11c sind die ermittelten Schwerpunkte der Steine durch Kreisscheiben dargestellt, dabei sind große Bewegungen von großen Steinen lila eingefärbt und kleinere Bewegungen hellblau

## 6. Datenveredelung

das Ergebnis dieses Zwischenschrittes wurden erneut die zusammenhängenden Bereich inklusive ihrer Schwerpunkte ermittelt. In Abbildung 6.11c sind die berechneten Zentren der Steine zusammengetragen. Bereiche mit einer Fläche kleiner 20 Pixel wurden komplett herausgefiltert. Die auf diese Weise ermittelten Positionen treffen die Zentren der Steine meist relativ gut. Versuche, die Positionen auf lokaler Ebene nachträglich zu verfeinern, indem beispielsweise ein Abgleich mit den Korngrenzen vollzogen wird, erwiesen sich als schwierig. Gerade in den Situationen, in denen eine Nacharbeit erforderlich gewesen wäre, hoben sich die bewegten Sedimentkörner kaum von der Umgebung ab und machten so die Differenzierung teilweise unmöglich. Das hier beschriebene Verfahren extrahiert die einzelnen Körner zuverlässig, sofern sich diese einzeln und nicht in der Gruppe fortbewegen. Aus den aufgezeichneten Sequenzen geht jedoch hervor, dass es immer wieder zu gruppenartigen Fortbewegungen kommt. Die Einzelkornbewegungen konnten in diesem Fall nicht herausgearbeitet werden, da die Bilddaten eine zu große Bewegungsunschärfe aufwiesen und die zwischen zwei Aufnahmen zurückgelegten Distanzen zu groß waren.

Das Verfahren zur Lagebestimmung zeigt für jeden Aufnahmezeitpunkt die sich bewegenden Partikel ohne jeglichen räumlichen oder zeitlichen Bezug zueinander. Um diesen Bezug herzustellen, wären die Partikel mit ihren Merkmalen zu erfassen und in einer Umkreissuche mit möglichen Kandidaten abzugleichen. Hierbei könnten die Verfahren des optischen Flusses helfen, indem sie eine initiale Suchrichtung vorgeben. Verfahren des optischen Flusses berechnen aus einer Bildfolge das Geschwindigkeitsfeld der sich bewegenden Objekte. Farneböck (2003) entwickelte einen besonders robusten Zwei-Bild Algorithmus, dem abrupte Änderungen keine Probleme bereiten. Dies ist im Bezug auf die Einzelkornbewegung äußerst hilfreich, da diese schlagartig starten, pausieren oder enden. Zudem kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Partikel sich ausschließlich in Hauptströmungsrichtung bewegen. In den Aufzeichnungen wurden auch quer und rückwärts gewandete Bewegungen beobachtet. Sofern die Einzelkornbe-

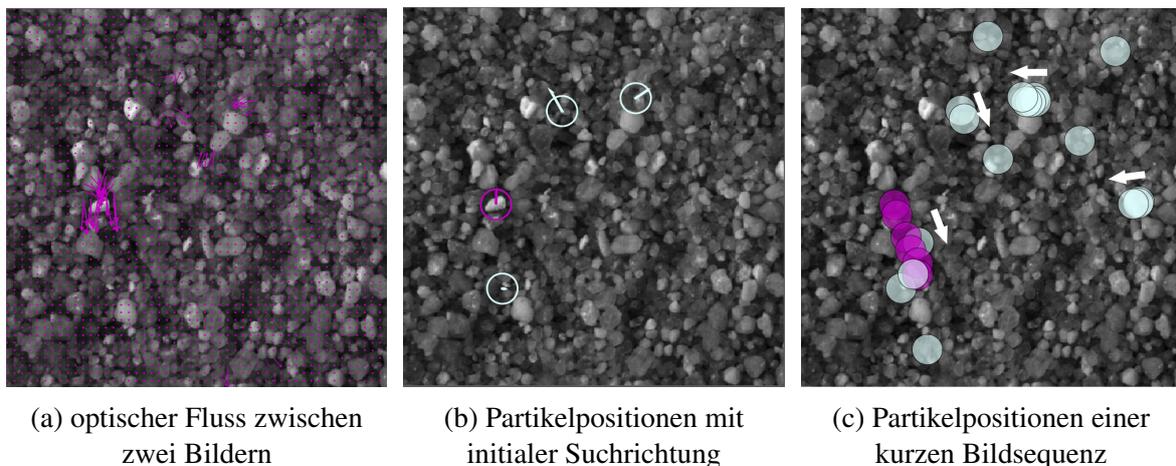


Abbildung 6.12.: Bewegungsrichtungen.

## 6. Datenveredelung

wegungen nicht zu groß waren, lieferte das Verfahren von Farneböck (2003) plausible Vektorfelder, siehe Abbildung 6.12a. Daraus können die initialen Suchrichtungen der zurückliegenden Sedimentkörner berechnet werden. Im konkreten Fall wurden hierzu die Richtungsvektoren in einem Umkreis von 10 Pixel gemittelt, siehe Abbildung 6.12b.

In Abbildung 6.12c sind die Partikelpositionen von zehn Aufnahmen in einem Bild zusammengeführt worden. Die Pfeile darin deuten die Bewegungsrichtungen an. Mit dem skizzierten Verfahren konnten die Stationen der sich bewegenden Steine sichtbar gemacht werden. Um daraus zuverlässig und präzise Bewegungspfade rekonstruieren zu können sind weitere Entwicklungsarbeiten notwendig. In der Abbildung 6.13 ist ein Video eingebunden, das die Ergebnisse der einzelnen Verarbeitungsschritte für eine kurze Aufnahmesequenz zeigt.

### 6.2.3. Zusammenfassung

Das Kapitel zur Datenveredelung skizziert im Sinne eines erweiterten Ausblicks verschiedene Möglichkeiten die erhobenen Bild- und Vermessungsdaten weiterzuverarbeiten. Eine davon ist die Auftrennung der hochaufgelösten Punktwolke in eine mittlere Sohlage und eine trendbereinigte Sohlhöhe. Aus der mittleren Sohlage gehen die volumetrischen Veränderungen, maximalen Auflandungshöhen oder Kolk-tiefen hervor. Mit der Standardabweichung der trendbereinigten Sohlhöhen kann auf die Rauheit geschlossen werden. Durch die hohe räumliche Auflösung war es möglich, die Berechnungen auf kleinräumigen Teilgebieten stattfinden zu lassen und so die räumliche Variabilität der Rauheitswerte heraus zu arbeiten. Die Verschneidung mit *BASEGRAIN* brachte die Erkenntnis, dass die Software in der Lage ist die Kornverteilung ebenfalls auf Teilgebietsebene zu ermitteln. Zudem konnte gezeigt werden, dass ein Zusammenhang zwischen der Standardabweichung der trendbereinigten Sohlhöhe und den in *BASEGRAIN* ermittelten charakteristischen Korndurchmessern besteht, der allerdings gewissen Schwankungen unterliegt. Um belastbare Aussagen treffen zu können, sind weitere Versuche notwendig. Gerade auch im Hinblick darauf, dass *BASEGRAIN* nicht für diesen Einsatzzweck ausgelegt ist und deshalb erst angepasst werden müsste. In ersten, noch eher rudimentären Versuchen zeigte sich, dass die sich bewegenden Partikel einer natürlichen Sohle und deren Bewegungsrichtung bestimmbar sind. Der Einsatz von synthetischen Bildern, die bereits prozessierte Informationen (z.B. trendbereinigte Sohlhöhen) zur Verfügung stellen sollten, erwies sich als wenig zielführend. Vielversprechender scheint eine Kombination aus Hintergrundsubtraktionsverfahren mit Verfahren des optischen Flusses, um die einzelnen Partikel nachzuverfolgen zu können. Dabei würde ein Einbild-Auswerteverfahren genügen, da die in- und extrinsischen Parameter der Kamera sowie die mittlere Sohlage bereits bekannt sind und somit von Bild- auf Objektraumkoordinaten geschlossen werden kann.

6. Datenveredelung

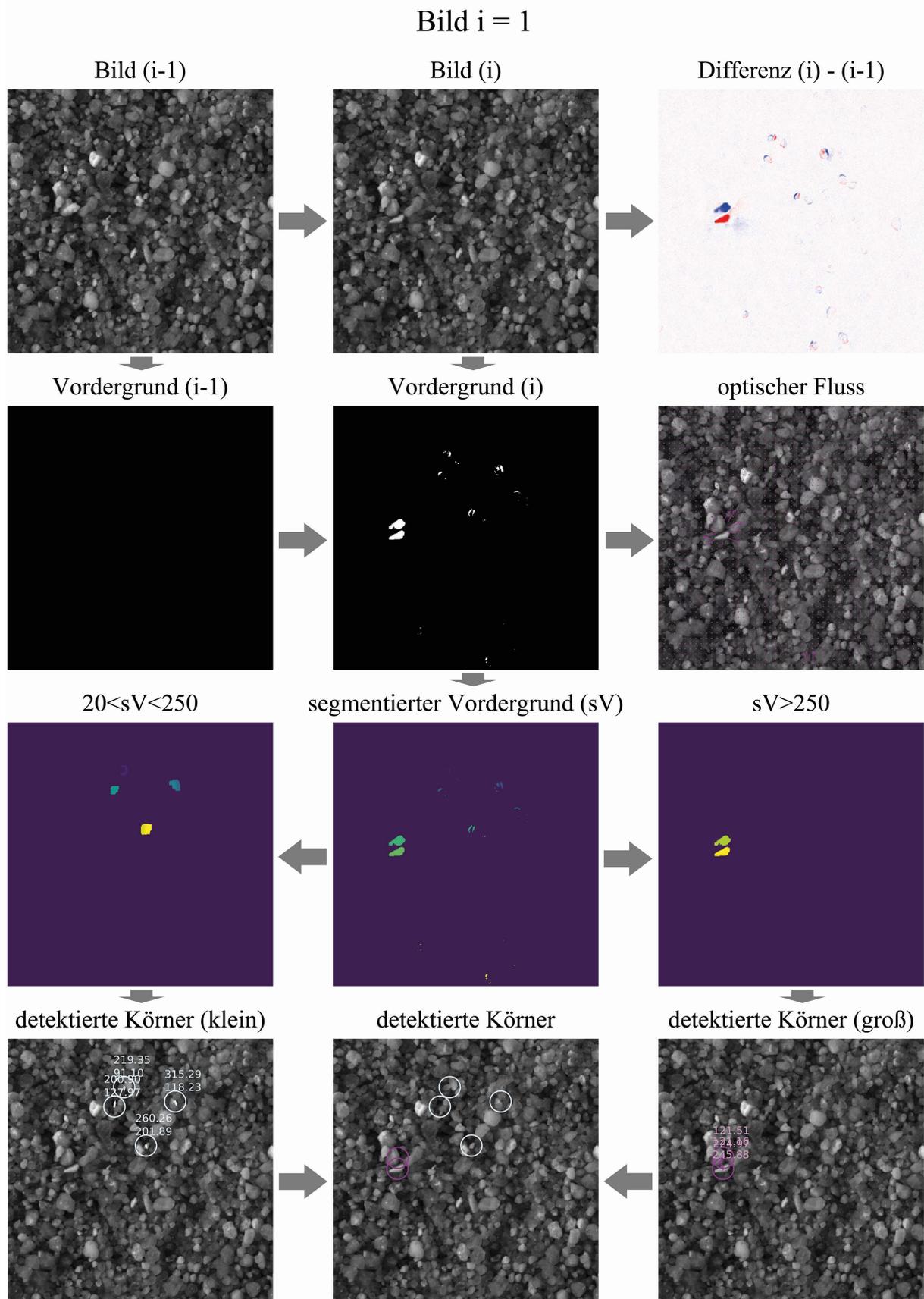


Abbildung 6.13.: Auswertung der Einzelkornbewegungen einer kurzen Sequenz (Video)

## 7. Fazit und Ausblick

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte unterwasserphotogrammetrische Messsystem erfasst die Sohle im laufenden Versuch. Zusammen mit dem konzipierten mehrstufigen Verfahren zur Korrektur der Brechungserscheinungen entstehen daraus hochaufgelöste digitale Sohlmodelle, aus denen die mittleren Sohllagen und die trendbereinigten Sohlhöhen abgeleitet werden können. Bei ausreichend hoher Aufnahmefrequenz geben die Aufnahmen sogar die Bewegungen der einzelnen Körner preis.

Das entwickelte Messsystem misst unterbrechungsfrei und macht so ein Anhalten oder gar ein Entleeren des Versuchsstandes hinfällig. Dadurch vereinfachte sich die Versuchsdurchführung und es konnten Störeffekte vermieden werden, die zwangsläufig bei der Entleerung oder Wiederbefüllung des Versuchsstandes entstehen. Der äußerliche Eingriff in die Strömung, der eine Störung hervorruft, konnte durch den Einsatz der strömungsgünstigen Unterwassergehäuse gegenüber den Systemen mit ebener Trennfläche reduziert werden. Für zukünftige Anwendungen ließen sich die Gehäuse noch weiter verkleinert, so dass die ins Wasser eintauchende Struktur die Strömung noch weniger stört. Zur Reduktion der Bewegungsunschärfe sollte in zukünftigen Versuchen mit einer stärkeren Beleuchtung gearbeitet werden, die geringere Belichtungszeiten erlaubt. Die implementierte Aufnahmetechnik stieß bei der Erfassung von Einzelkornbewegungen an ihre Grenzen, da die ankommenden Datenströme die eigenentwickelte Aufzeichnungssoftware überforderten. Zur Nutzung höherer Bildwiederholraten ist die Aufzeichnungssoftware komplett zu überarbeiten und mit einem leistungsfähigeren Speicherkonzept auszustatten. In diesem Zuge wäre auch zu prüfen, ob durch die Umstellung der Farbtiefe von 8 bit auf 10 bit Verbesserungspotential gegeben ist. Diese Umstellung beträfe auch den kompletten Auswerteprozess. In der aktuellen Version von *OpenCV* können einige Algorithmen nur 8 bit Bilder verarbeiten, die durch Alternativen ersetzt oder umprogrammiert werden müssten. Für zukünftige Anwendungen kann die Anzahl und Anordnung der Aufnahmeeinheiten beliebig erweitert und verändert werden, um das Geschehen an der Sohle bestmöglich nachzuverfolgen.

Aus den gewonnenen Bild- und Vermessungsdaten konnten räumlich hochaufgelöste Rauheitswerte extrahiert und Kornverteilungen ermittelt werden. Um deren genauen Zusammenhang zu ermitteln, sind zusätzliche Versuche und eine Weiterentwicklung von *BASEGRAIN* erforderlich. In diesem Zusammenhang wäre es erstrebenswert, zukünftig simultan die sohnahen Strömungsgeschwindigkeiten zu erfassen. Idealerweise könnte ein tomographisches PIV- oder

## *7. Fazit und Ausblick*

PTV-Verfahren Einsatz finden. Eine weitere, aber deutlich einfacher zu realisierende Erweiterung wäre die Anbringung einer seitlichen Kamera, die einen ersten Einblick in die vertikal ablaufenden Sohlprozesse bietet.

Das entwickelte unterwasserphotogrammetrische Messsystem ist einsatzbereit und wartet darauf erste produktive Daten zu erheben.

## Literaturverzeichnis

- Aberle, J. (2000). *Untersuchung der Rauheitsstruktur zur Bestimmung des Fließwiderstandes in Gebirgsbächen unter Klarwasserabfluß*. Dissertation, Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH). <https://doi.org/10.5445/IR/2742000>.
- Adam, V. (1993). *William Thompson - 100 years of underwater photography?* [http://www.bsoup.org/Articles/William\\_Thompson.php](http://www.bsoup.org/Articles/William_Thompson.php).
- Alvarez, L., Gómez, L., und Sendra, J. R. (2011). Accurate Depth Dependent Lens Distortion Models: An Application to Planar View Scenarios. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 39(1):75–85. <https://doi.org/10.1007/s10851-010-0226-2>.
- Anwer, A., Azhar Ali, S. S., Khan, A., und Meriaudeau, F. (2017). Underwater 3-D Scene Reconstruction Using Kinect v2 Based on Physical Models for Refraction and Time of Flight Correction. *IEEE Access*, 5:15960–15970. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2733003>.
- Aufleger, M., Steinbacher, F., Baran, R., und Neisch, V. (2015). Airborne Hydromapping - Hochauflösende Gewässervermessung „wie im Flug“ *Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen*, Band 53, Seiten 415–423.
- Balzer, L. (2015). *Adaption des Starter Kits von DAVID-Laserscanner zur räumlichen Vermessung der Sohlenlage eines Brückenkolkes im Modellversuch*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit, Technische Universität München.
- Bertin, S., Friedrich, H., Delmas, P., und Chan, E. (2013). On the Use of Close-Range Digital Stereo-Photogrammetry to Measure Gravel-Bed Topography in a Laboratory Environment. In *Proceedings of the 35th IAHR World Congress*, Chengdu, China.
- Bolik, P. (2014). *Digitale Rekonstruktion von Sohlgeometrien*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit, Technische Universität München.
- Born, M. (1972). *Optik*. Berlin. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-61980-9>.
- Born, M. und Wolf, E. (1970). *Principles of Optics*. 4th edition.
- Bräuer-Burchardt, C., Heinze, M., Munkelt, C., Kuhmstedt, P., und Notni, G. (2006). Distance Dependent Lens Distortion Variation in 3D Measuring Systems Using Fringe Projection. In *Proceedings of the British Machine Vision Conference 2006*, Seiten 34.1–34.10. <https://doi.org/10.5244/C.20.34>.
- Brown, D. C. (1966). Decentering Distortion of Lenses. *Photogrammetric Engineering*, Seiten 444–462.

## Literaturverzeichnis

- Brown, D. C. (1971). Close-range camera calibration. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, (37(8)):855–866.
- Burns, J. H. R. und Delparte, D. (2017). Comparison of commercial structure-from-motion photogrammetry software used for underwater three-dimensional modeling of coral reef environments. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W3:127–131. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-127-2017>.
- Butler, J., Lane, S., Chandler, J., und Porfiri, E. (2002). Through-Water Close Range Digital Photogrammetry in Flume and Field Environments. *The Photogrammetric Record*, 17(99):419–439. <https://doi.org/10.1111/0031-868X.00196>.
- Conevski, S., Guerrero, M., Rütther, Nils, Bombardier, J., und Rennie, C. (2017). ADCP's capabilities in measuring the bed load velocity: A confirmation by means of image velocimetry under controlled conditions. In *Hydraulic Measurements and Experimental Methods 2017 Conference*, Durham, USA.
- Conrady, A. E. (1919). Decentred Lens-Systems. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 79(5):384–390. <https://doi.org/10.1093/mnras/79.5.384>.
- Curran, J. C., Waters, K. A., und Cannatelli, K. M. (2015). Real time measurements of sediment transport and bed morphology during channel altering flow and sediment transport events. *Geomorphology*, 244:169–179. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.009>.
- Dancu, A., Fourgeaud, M., Franjic, Z., und Avetisyan, R. (2014). Underwater reconstruction using depth sensors. In *SIGGRAPH Asia 2014 Technical Briefs*, Seiten 1–4. <https://doi.org/10.1145/2669024.2669042>.
- Desch, S. (2015). *Volumenbestimmung von Kolkereignissen*. Unveröffentlichte Masterarbeit, Technische Universität München.
- Detert, M., Schütz, C., und Czerny, R. (2018). Development and Tests of a 3D Fish-Tracking Videometry System for an Experimental Flume. *E3S Web of Conferences*, 40:03018. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184003018>.
- Detert, M. und Weitbrecht, V. (2012). Automatic object detection to analyze the geometry of gravel grains – a free stand-alone tool. In *River flow 2012*, Seiten 595–600, Boca Raton, Fla.
- Djurdjani und Laksono, D. (2016). Open source stack for Structure from Motion 3D reconstruction: A geometric overview. In *2016 6th International Annual Engineering Seminar (InAES)*, Seiten 196–201. <https://doi.org/10.1109/INAES.2016.7821933>.
- Dold, J. (1997). *Ein hybrides photogrammetrisches Industriemeßsystem höchster Genauigkeit und seine Überprüfung*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München.
- Dorer, H. (1984). Ähnlichkeit bei flussbaulichen Modellen *Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau*, Band 54. Karlsruhe. <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102924>.

## Literaturverzeichnis

- Eder, K., Rapp, C., Kohl, V., Hanrieder, B., und Stilla, U. (2011). Photogrammetric monitoring of under water erosion in the vicinity of cylindrical bridge piers. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII-3/W22:167–171. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXVIII-3-W22-167-2011>.
- Evers, F. M. (2017). Spatial propagation of landslide generated impulse waves *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW)*, Band 244. Zürich. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000209471>.
- Farneböck, G. (2003). Two-Frame Motion Estimation Based on Polynomial Expansion. In *Image Analysis*, Seiten 364–370, Cham. [https://doi.org/10.1007/3-540-45103-X\\_50](https://doi.org/10.1007/3-540-45103-X_50).
- Fehr, R. (1987). Einfache Bestimmung der Korngrößenverteilung von Geschiebematerial mit Hilfe der Linienzahlanalyse. *Schweizer Ingenieur und Architekt*, (38):1104–1109.
- Feurer, D., Bailly, J.-S., Puech, C., Le Coarer, Y., und Viau, A. A. (2008). Very-high-resolution mapping of river-immersed topography by remote sensing. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 32(4):403–419. <https://doi.org/10.1177/0309133308096030>.
- Frank, P.-J. (2016). *Hydraulics of spatial dike breaches*. Dissertation, ETH Zurich. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-010803310>.
- Fraser, C. S., Cronk, S., und Stamatopoulos, C. (2012). Implementation of zoom-dependent camera calibration in close-range photogrammetry. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXIX-B5:15–19. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXIX-B5-15-2012>.
- Fraser, C. S. und Shortis, M. R. (1992). Variation of Distortion within the Photographic Field. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, (Vol. 58 No. 6):851–855.
- Fraser, C. S., Shortis, M. R., und Ganci, G. (1995). Multisensor system self-calibration. In *Videometrics IV*, SPIE Proceedings, Seiten 2–18. <https://doi.org/10.1117/12.220890>.
- Friedl, F., Schneider, J., Hinkelammert, F., und Weitbrecht, V. (2018). Through-water terrestrial laser scanning in hydraulic scale models: proof of concept. *Journal of Hydraulic Research*, 56(4):551–559. <https://doi.org/10.1080/00221686.2017.1372820>.
- Fryer, J. G. (1983). Photogrammetry Through Shallow Water. *Australian journal of geodesy, photogrammetry, and surveying*, (38):25–38.
- Fryer, J. G. und Brown, D. C. (1986). Lens Distortion for Close-Range Photogrammetry. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, (Vol. 52 No.1):51–58.
- Fryer, J. G. und Kniest, H. T. (1985). Errors in depth determination caused by waves in through-water photogrammetry. *The Photogrammetric Record*, 11(66):745–753. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.1985.tb01326.x>.
- Geiger, A., Moosmann, F., Car, O., und Schuster, B. (2012). Automatic camera and range sensor calibration using a single shot. In *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Seiten 3936–3943. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2012.6224570>.

## Literaturverzeichnis

- Godding, R., Hentschel, B., und Kauppert, K. (2003). Videometrie im wasserbaulichen Versuchswesen. *Wasserwirtschaft: Technik, Forschung, Praxis*, Seiten 36–40.
- Grossberg, M. D. und Nayar, S. K. (2005). The Raxel Imaging Model and Ray-Based Calibration. *International Journal of Computer Vision*, 61(2):119–137. <https://doi.org/10.1023/B:VISI.0000043754.56350.10>.
- Günter, A. (1971). *Die kritische mittlere Sohlenschubspannung bei Geschiebemischungen unter Berücksichtigung der Deckschichtbildung und der turbulenzbedingten Sohlenschubspannungsschwankungen*. Dissertation, ETH Zürich. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-000089812>.
- Harvey, E., Cappo, M., Shortis, M., Robson, S., Buchanan, J., und Speare, P. (2003). The accuracy and precision of underwater measurements of length and maximum body depth of southern bluefin tuna (*Thunnus maccoyii*) with a stereo–video camera system. *Fisheries Research*, 63(3):315–326. [https://doi.org/10.1016/S0165-7836\(03\)00080-8](https://doi.org/10.1016/S0165-7836(03)00080-8).
- Heigermoser, T. (2020). *Calibration and Application of a Close-Range Camera Setup in Underwater Environment*. Unveröffentlichte Masterarbeit, Technische Universität München.
- Henning, M., Hentschel, B., und Hüsener Thorsten (2008). Determination of channel morphology and flow features in laboratory models using 3D-photogrammetry. In *River flow 2008*. Izmir, Türkei.
- Henning, M., Hentschel, B., und Hüsener Thorsten (2009). Photogrammetric System for Measurement and Analysis of Dune Movement. In *33rd IAHR Congress 2009*. Madrid, Spain.
- Henning, M., Sahrhage, V., und Hentschel, B. (2007). *3D-PTV – Ein System zur optischen Vermessung von Wasserspiegellagen und Fließgeschwindigkeiten in physikalischen Modellen*. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau. Karlsruhe. <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102608>.
- Hoffmann, M., Ernst, A., Bergen, T., Hettenkofer, S., und Garbas, J.-U. (2017). A Robust Chessboard Detector for Geometric Camera Calibration. In *Proceedings of the 12th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications*, Seiten 34–43. <https://doi.org/10.5220/0006104300340043>.
- Hofmann, P. (2009). *Freie Rotation im Raum*. <https://www.uninformativ.de/bin/SpaceSim-2401fee.pdf>.
- Höhle, J. (1971). *Zur Theorie und Praxis der Unterwasser-Photogrammetrie*. Dissertation, Bayerische Akademie der Wissenschaften.
- Holland, M. (2015). *Entwicklung eines Bewertungsverfahrens für digitalisierte Sohlgeometrien*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit, Technische Universität München.
- Hsua, P.-H. und Wang, C.-K. (2013). Acquiring underwater DSM using close-range photogrammetry. In *32nd Asian Conference on Remote Sensing 2011*, Seiten 267–272.
- IDS (2020). *uEye-Handbuch*. [www.ids-imaging.com](http://www.ids-imaging.com).

## Literaturverzeichnis

- Jähne, B. (2012). *Digitale Bildverarbeitung und Bildgewinnung*. Berlin and Heidelberg, 7., neu bearbeitete Aufl. 2012. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-04952-1>.
- Jordt, A. (2014). *Underwater 3D Reconstruction Based on Physical Models for Refraction and Underwater Light Propagation*. Dissertation, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.
- Jordt, A., Köser, K., und Koch, R. (2016). Refractive 3D reconstruction on underwater images. *Methods in Oceanography*, 15-16:90–113. <https://doi.org/10.1016/j.mio.2016.03.001>.
- Kaveh, K. (2019). *Development of Data Driven Models for Hydromorphology and Sediment Transport*. Dissertation, Technische Universität München.
- Kleiber, S. (2015). *Photogrammetrie und Strukturiertes Lichtverfahren - Zwei Verfahren zur Bestimmung von 3D-Objektdaten im Vergleich am Beispiel von Auskolkungen an Brückens Pfeilern in Fließgewässern*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit, Technische Universität München.
- Knight, D. W. (2015). *Dome port theory*. <http://www.camerasunderwater.co.uk>.
- Koch, R. (1993). Dynamic 3-D scene analysis through synthesis feedback control. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 15(6):556–568. <https://doi.org/10.1109/34.216725>.
- Kotowski, R. (1987). *Zur Berücksichtigung lichtbrechender Flächen im Strahlenbündel*. Dissertation, Bayerische Akademie der Wissenschaft.
- Kunz, C. und Singh, H. (2008). Hemispherical refraction and camera calibration in underwater vision. In *OCEANS 2008*, Seiten 1–7. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2008.5151967>.
- Lague, D., Brodu, N., und Leroux, J. (2013). Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 82:10–26. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009>.
- Lavest, J. M., Rives, G., und Lapresté, J. T. (2003). Dry camera calibration for underwater applications. *Machine Vision and Applications*, 13(5-6):245–253. <https://doi.org/10.1007/s00138-002-0112-z>.
- Liepert, T., Schlagenhauer, M., Weiß, F., von der Straten, E., und Rochlus, M. (2016). Sohltopographische Vermessung im wasserbaulichen Versuchswesen mittels Kinect *Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft*, Band 134. München.
- Litfin, G. (2005). *Technische Optik in der Praxis*. 3. Auflage. <https://doi.org/10.1007/b137974>.
- Liu, S., Liu, Y., Wang, Z., und Cao, Y. (2016). Automatic chessboard corner detection method. *IET Image Processing*, 10(1):16–23. <https://doi.org/10.1049/iet-ipr.2015.0126>.
- Lowe, D. G. (1999). Object recognition from local scale-invariant features. In *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*, Seiten 1150–1157 vol.2. <https://doi.org/10.1109/ICCV.1999.790410>.

## Literaturverzeichnis

- Luhmann, T. (2018). *Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen - Methoden - Beispiele*. Berlin and Offenbach, 4., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. <http://www.vde-verlag.de/buecher/537640/nahbereichsphotogrammetrie.html>.
- Maas, H.-G. (1992a). Complexity analysis for the establishment of image correspondences of dense spatial target fields. In *The international archives of photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, Seiten 102–107.
- Maas, H.-G. (1992b). *Digitale Photogrammetrie in der dreidimensionalen Strömungsmesstechnik*. Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-000627387>.
- Magill, A. A. (1955). Variation in Distortion with Magnification. *Journal of the Optical Society of America*, 45(3):148. <https://doi.org/10.1364/JOSA.45.000148>.
- Malavasi, S., Radice, A., und Ballio, F. (2004). Study of sediment motion in a local scour hole through an image processing technique. In *River Flow 2004*, Seiten 535–542. Crc Press. <https://doi.org/10.1201/b16998-70>.
- Maral, H. (2015). *Photogrammetrie und Strukturiertes Lichtverfahren - Zwei Verfahren zur Bestimmung von 3D-Objektdaten im Vergleich am Beispiel von Auskolkungen an Brückenpfeilern in Fließgewässern*. Unveröffentlichte bachelorarbeit, Technische Universität München.
- Menna, F., Agrafiotis, P., und Georgopoulos, A. (2018). State of the art and applications in archaeological underwater 3D recording and mapping. *Journal of Cultural Heritage*, 33:231–248. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.02.017>.
- Menna, F., Nocerino, E., Fassi, F., und Remondino, F. (2016). Geometric and Optic Characterization of a Hemispherical Dome Port for Underwater Photogrammetry. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 16(1). <https://doi.org/10.3390/s16010048>.
- Menna, F., Nocerino, E., und Remondino, F. (2017). FLAT VERSUS HEMISPHERICAL DOME PORTS IN UNDERWATER PHOTOGRAMMETRY. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W3:481–487. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-481-2017>.
- Meyer-Peter, E. und Müller, R. (1949). Eine Formel zur Berechnung des Geschiebetriebs. *Schweizerische Bauzeitung*, (67):29–32.
- Mobley, C. D. (1994). *Light and water: Radiative transfer in natural waters*. San Diego, USA.
- Moraes, C. (2016). Comparing 7 photogrammetry systems. Which is the best one? <https://arc-team-open-research.blogspot.de/2016/12/comparing-7-photogrammetry-systems.html>.
- Müller, R. (1943). Theoretische Grundlagen der Fluss- und Wildbachverbauungen. ETH Zürich. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-000103471>.
- Murase, T., Tanaka, M., Tani, T., Miyashita, Y., Ohkawa, N., Ishiguro, S., Suzuki, Y., Kayanne, H., und Yamano, H. (2008). A Photogrammetric Correction Procedure for Light Refraction Effects at a Two-Medium Boundary. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 74(9):1129–1136. <https://doi.org/10.14358/PERS.74.9.1129>.

## Literaturverzeichnis

- Nasse, H. H. (2010). *Schärfentiefe und Bokeh*. <https://lenspire.zeiss.com/photo/app/uploads/2018/04/Article-Bokeh-2010-DE.pdf>.
- Noack, M., Schmid, G., Beckers, F., Haun, S., und Wieprecht, S. (2018). PHOTOSED—PHOTOgrammetric Sediment Erosion Detection. *Geosciences*, 8(7):243. <https://doi.org/10.3390/geosciences8070243>.
- Peyton, R. L., Haeffner, B. A., Anderson, S. H., und Gantzer, C. J. (1992). Applying X-ray CT to measure macropore diameters in undisturbed soil cores. *Geoderma*, 53(3-4):329–340. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(92\)90062-C](https://doi.org/10.1016/0016-7061(92)90062-C).
- Pfleger, F. (2010). *Experimentelle Untersuchung der Auskolkung um einen zylindrischen Brückenpfeiler*. Dissertation, Technische Universität München.
- Radice, A., Malavasi, S., und Ballio, F. (2006). Solid transport measurements through image processing. *Experiments in Fluids*, 41(5):721–734. <https://doi.org/10.1007/s00348-006-0195-9>.
- Radice, A., Malavasi, S., und Ballio, F. (2008). Sediment Kinematics in Abutment Scour. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(2):146–156. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:2\(146\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:2(146)).
- Rapp, C., Eder, K., und Stilla, U. (2012). 3D determination of the scour evolution around a bridge pier by photogrammetric means. In *River flow 2012*, Seiten 943–950. Boca Raton, Fla.
- Rebikoff, D. (1968). The Rebikoff Pegasus Underwater Photographic System Evolution, Design Criteria And Typical Applications In 1967. In *Underwater Photo-Optical Instrumentation Applications II*, SPIE Proceedings, Seiten 91–100. <https://doi.org/10.1117/12.946736>.
- Rebikoff, D. (1975). Progress In Underwater Photographic And Television Imaging And Lighting Optics. In *Ocean Optics IV*, SPIE Proceedings, Seiten 121–127. <https://doi.org/10.1117/12.954500>.
- Rochlus, M. (2014). *Entwicklung und Tauglichkeitsuntersuchung eines Verfahrens zur quantitativen Bestimmung von Kolkereignissen im physikalischen Modell mit Hilfe der Kinect*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit, Technische Universität München.
- Rüther, N., Huber, S., Spiller, S., und Aberle, J. (2013). Verifying a photogrammetric method to quantify grain size distribution of developed armor layers. In *Proceedings of the 35th IAHR World Congress*.
- Schmelz, S. (2018). *Photogrammetrische Untersuchung des Entwicklungsprozesses eines Brückenpfeilerkolks*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit, Technische Universität München.
- Schmölzl, M. (2018). *Application of Three-Dimensional Particle-Velocimetry (3D-PTV) on Sediment Research*. Unveröffentlichte Masterarbeit, Technische Universität München.

## Literaturverzeichnis

- Sedlazeck, A. und Koch, R. (2012). Perspective and Non-perspective Camera Models in Underwater Imaging – Overview and Error Analysis. In *Outdoor and Large-Scale Real-World Scene Analysis Lecture Notes in Computer Science*, Band 7474, Seiten 212–242. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-34091-8\\_{\\_}10](https://doi.org/10.1007/978-3-642-34091-8_{_}10).
- Semyonov, D. (2011). *Algorithms used in Photoscan: [Msg 2]*. [www.agisoft.ru/forum/index.php?topic=89.0](http://www.agisoft.ru/forum/index.php?topic=89.0).
- Shields, A. (1936). Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung *Mitteilungen der Preußischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau*, Band 26. Berlin.
- Shim, J. und Duan, J. G. (2017). Experimental study of bed-load transport using particle motion tracking. *International Journal of Sediment Research*, 32(1):73–81. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2016.10.002>.
- Shortis, M. (2015). Calibration Techniques for Accurate Measurements by Underwater Camera Systems. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 15(12):30810–30826. <https://doi.org/10.3390/s151229831>.
- Shortis, M. R., Clarke, T. A., und Short, T. (1994). Comparison of some techniques for the subpixel location of discrete target images. In *Videometrics III*, SPIE Proceedings, Seiten 239–250. <https://doi.org/10.1117/12.189136>.
- Singh, A., Guala, M., Lanzoni, S., und Foufoula-Georgiou, E. (2012). Bedform effect on the reorganization of surface and subsurface grain size distribution in gravel bedded channels. *Acta Geophysica*, 60(6). <https://doi.org/10.2478/s11600-012-0075-z>.
- Smart, G. M., Duncan, M. J., und Walsh, J. M. (2002). Relatively Rough Flow Resistance Equations. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(6):568–578. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2002\)128:6\(568\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:6(568)).
- Spiller, S., Rütger, N., und Baumann, B. (2012). Artificial Reproduction of the Surface Structure in a Gravel Bed. In *Proceedings of 2nd IAHR Europe Congress*. München, Deutschland.
- Spiller, S., Rütger, N., und Friedrich, H. (2015). Dynamic Lift on an Artificial Static Armor Layer During Highly Unsteady Open Channel Flow. *Water*, 7(9):4951–4970. <https://doi.org/10.3390/w7094951>.
- Steinbacher, F., Pfennigbauer, M., und Aufleger, M. (2010). Airborne hydromapping area-wide surveying of shallow water areas. In *River flow 2010*, Seiten 1709–1713. Karlsruhe, Deutschland.
- Sun, P., Lu, N., und Dong, M. (2017). Modelling and calibration of depth-dependent distortion for large depth visual measurement cameras. *Optics express*, 25(9):9834–9847. <https://doi.org/10.1364/OE.25.009834>.
- Tewinkel, G. C. (1963). Water Depths from Aerial Photographs. *Photogrammetric Engineering*, Seiten 1037–1042.

## Literaturverzeichnis

- Treibitz, T., Schechner, Y., Kunz, C., und Singh, H. (2012). Flat Refractive Geometry. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 34(1):51–65. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2011.105>.
- Tsui, C.-L., Schipf, D., Lin, K.-R., Leang, J., Hsieh, F.-J., und Wang, W.-C. (2014). Using a Time of Flight method for underwater 3-dimensional depth measurements and point cloud imaging. In *OCEANS 2014*, Seiten 1–6. <https://doi.org/10.1109/OCEANS-TAIPEI.2014.6964471>.
- van Damme, T. (2015). Computer vision photogrammetry for underwater archaeological site recording in a low-visibility environment. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-5/W5:231–238. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W5-231-2015>.
- van Rijn, L. C. (1993). *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas*.
- von der Straten, E. (2015). *Vergleich des durch die Kinect 1 und Kinect 2 aufgenommenen Brückenkolkvolumens an zwei physikalischen Modellen und ihre Skalierbarkeit*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit, Technische Universität München.
- Warmedinger, L. (2017). *Versuche zur Durchführbarkeit und Genauigkeit von unterwasserphotogrammetrischen Sohlaufnahmen mit PhotoScan von Agisoft*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit, Technische Universität München.
- Weiß, F. (2015). *Vergleichsanalyse der Kinect 1 und Kinect 2 in Bezug auf die Volumenbestimmung von Kolkereignissen im physikalischen Modell*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit, Technische Universität München.
- Wessels, M., Hilbe, M., Mainberger, M., und Anselmetti, F. (2013). Hydroakustische Methoden. Möglichkeiten und Grenzen zur Langzeitüberwachung archäologischer Denkmale im Flachwasser. *Vorarlberg Museum Schriften*. <https://doi.org/10.7892/boris.45628>.
- Westaway, R. M., Lane, S. N., und Hicks, D. M. (2001). Remote Sensing of Clear-Water, Shallow, Gravel-Bed Rivers Using Digital Photogrammetry. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 67(11):1271–1281.
- Wester-Ebbinghaus, W. (1983). *Einzelstandpunkt-Selbstkalibrierung: Ein Beitrag zur Feldkalibrierung von Aufnahmekammern*. Habilitation, Deutsche geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften.
- Wester-Ebbinghaus, W. (1985). Verfahren zur Feldkalibrierung von photogrammetrischen Aufnahmekammern im Nahbereich, Seiten 106–114. Veröffentlichung. Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften. Reihe B. Beck, München.
- Winnik, X. und Schulz, M. (2012). Was hat die Blende im Fotoapparat verloren?-Vorschläge zur Behandlung der Schärfentiefe im Physikunterricht. In *Didaktik der Physik-Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*, Mainz, Deutschland.

## Literaturverzeichnis

- Wittlinger, F. (2016). *Entwicklung einer Methode zum Scannen des zeitlichen Verlaufs eines Brückenkolkes mit strukturiertem Licht im Zwei-Phasen-System*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit, Technische Universität München.
- Wolff, K. (2007). *Zur Approximation allgemeiner optischer Abbildungsmodelle und deren Anwendung auf eine geometrisch basierte Mehrbildzuordnung am Beispiel einer Mehrmedienabbildung*. Inaugural-dissertation, Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn.
- Yen, C.-l. und Lee, K. T. (1995). Bed Topography and Sediment Sorting in Channel Bend with Unsteady Flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(8):591–599. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1995\)121:8\(591\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1995)121:8(591)).
- Zhang, Z. (2000). A flexible new technique for camera calibration. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 22(11):1330–1334. <https://doi.org/10.1109/34.888718>.
- Zivkovic, Z. (2004). Improved adaptive Gaussian mixture model for background subtraction. In *Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition, 2004. ICPR 2004*, Seiten 28–31 Vol.2. <https://doi.org/10.1109/ICPR.2004.1333992>.
- Zivkovic, Z. und van der Heijden, F. (2006). Efficient adaptive density estimation per image pixel for the task of background subtraction. *Pattern Recognition Letters*, 27(7):773–780. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2005.11.005>.
- Zou, X.-j., Ma, Z.-m., Hu, W.-b., Wang, J.-c., Song, H., Hu, X.-y., und Tao, W.-l. (2015). B-mode ultrasound imaging measurement and 3D reconstruction of submerged topography in sediment-laden flow. *Measurement*, 72:20–31. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.04.026>.

# Anhang

## A. Kaustiken

Kaustiken für komplexe Systeme bestimmen zu können war bislang komplexen und aufwendigen numerischen Verfahren vorenthalten (Kunz und Singh, 2008, Sedlazeck und Koch, 2012). Als Alternative zu den bisherigen Verfahren wird im Nachfolgenden ein geometrisches Näherungsmodell vorgestellt. Mit Kenntnis der Kaustikgeometrie ist es möglich, geometrische Kenngrößen daraus abzuleiten, die dann für einen Vergleich unterschiedlicher Systemaufbauten herangezogen werden können.

### A.1. Näherungsmodell

In Zuge der geometrischen Konstruktion von Brennflächen fiel auf, dass die Schnittpunkte von benachbarten Abbildungsstrahlen augenscheinlich auf der Kaustik liegen, siehe Abbildung A.1 links. Deshalb wurden sie in einem ersten Schritt für eine grobe Rekonstruktion der Kaustik herangezogen.

Bei vergrößerter Darstellung des allgemeinen Falls eines Strahlentripels, wie in Abbildung A.1 (mittig) skizziert, fiel auf, dass die Schnittpunkte der Abbildungsstrahlen  $S_1$  und  $S_2$  erkennbar von der Kaustik abrücken. Zugleich wird sichtbar, dass die Verbindungsgerade der Schnittpunkte den Berührungspunkt  $T$  mit der Kaustik beherbergen muss. Die Lage des Berührungspunktes hängt von der Krümmungsänderung der Kaustik ab. Da dies a priori unbekannt ist, lässt sie sich für den allgemeinen Fall nicht direkt bestimmen. Einzig für den Sonderfall einer konstanten Krümmung ist es möglich, die Lage des Berührungspunktes  $T$  direkt zu berechnen. In diesem Fall halbiert er die Verbindungsgerade  $\overline{S_1 S_2}$  (siehe A.1 - rechts). Das Näherungsmodell macht sich diesen Sonderfall zu Nutze, indem zur Konstruktion eines Berührungspunktes drei Abbildungsstrahlen, die sich lediglich um wenige Tausendstel Grad unterscheiden, herangezogen werden. Hierdurch ist die Annahme einer konstanten Krümmung für den betrachteten Abschnitt der Kaustik hinreichend genau erfüllt.

Für die Rekonstruktion einer kompletten Brennfläche sind für alle Verlängerungen der objektseitig, im Wasser befindlichen Abbildungsstrahlen eines modellierten Strahlenbüschels die Berührungspunkte durch das oben beschriebene Näherungsverfahren zu bestimmen. Das zu modellierende Strahlenbüschel kann im Prinzip frei gewählt werden. Mit Hinblick auf einen Systemvergleich ist es empfehlenswert, das modellierte Strahlenbüschel mit der im Versuch eingesetzten Optik abzugleichen. Die Modellierung des Strahlengangs erfolgt mit Hilfe der in Abschnitt 4.3 vorgestellten Strahlgangsbeschreibungen.

## Anhang

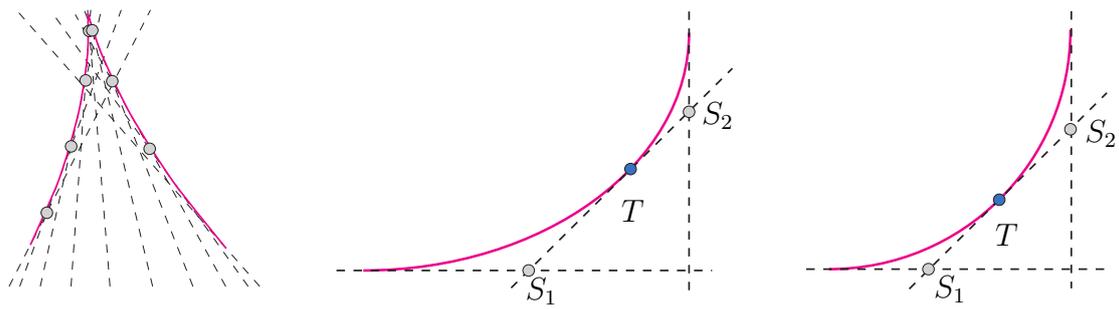
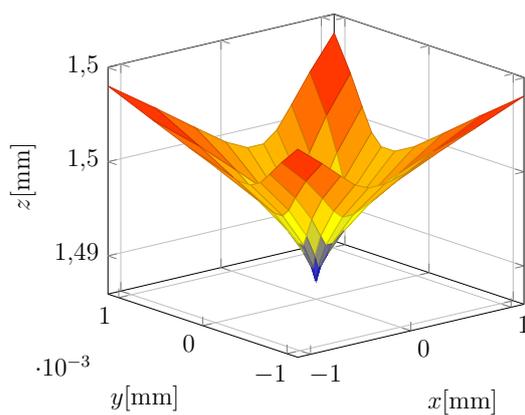
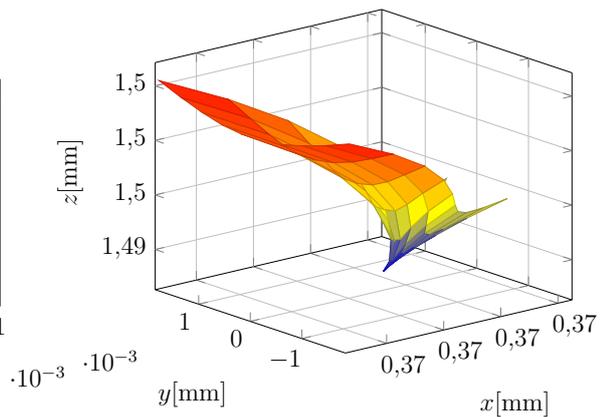


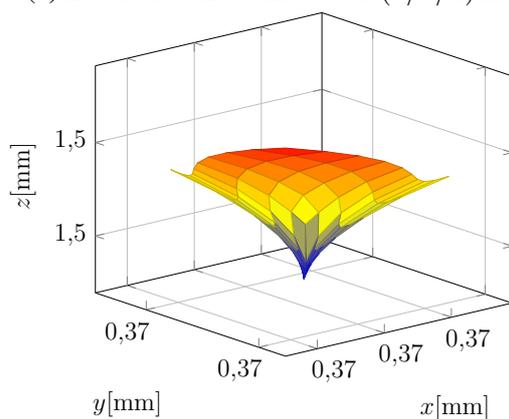
Abbildung A.1.: Näherungsmodell zur Konstruktion von Kaustiken: links: Abbildungsstrahlen (gestrichelt) einer imperfekten Domeport-Konfiguration mit daraus resultierender Kaustik (durchgezogen, magenta) und den Schnittpunkten der Abbildungsstrahlen; mittig: drei Abbildungsstrahlen mit ihren Schnittpunkten und dem Berührungspunkt mit der Kaustik für den allgemeinen Fall; rechts: drei Abbildungsstrahlen mit ihren Schnittpunkten und dem Berührungspunkt mit der Kaustik für den Fall einer konstanten Krümmung;



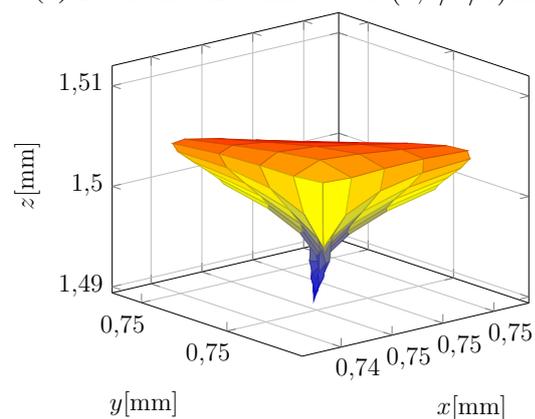
(a) Zentrumsexzentrizität von  $(0/0/2)$ mm



(b) Zentrumsexzentrizität von  $(0,5/0/2)$ mm



(c) Zentrumsexzentrizität von  $(0,5/0,5/2)$ mm



(d) Zentrumsexzentrizität von  $(1/1/2)$ mm

Abbildung A.2.: Brennflächen hemisphärischer Trennflächen bei variierender Zentrumsexzentrizität

## A.2. Geometrische Kenngrößen

Mit Kenntnis der Brennflächengeometrie lassen sich die Eigenschaften eines optischen Aufbaus visuell beurteilen. Sie legen offen, inwieweit die tatsächliche Abbildung im Mehrmedienfall von der angenommenen perspektivischen Abbildung abweicht. Zugleich ermöglichen sie aber auch einen Systemvergleich auf Grundlage messbarer Kenngrößen. Jedoch gibt es kein standardisiertes Auswertevorgehen, vielmehr erfolgt die Auswertung und Interpretation dimensionsbehaftet, wie z.B. in Sedlazeck und Koch (2012).

Um Aussagen, die Systemaufbau unabhängig sind, treffen zu können, sollen im Rahmen dieser Arbeit dimensionslose Kenngrößen Verwendung finden. Im Nachfolgenden sind vier dimensionslose Kenngrößen, die den mittleren Trennflächenabstand  $sp_m$  als Bezugsgröße nutzen, vorgestellt.

$$\text{ebene Trennfläche} \quad sp_m = d_a + \frac{d_g}{2} \quad (1)$$

$$\text{hemisphärische Trennfläche} \quad sp_m = \frac{r_i + r_e}{2} \quad (2)$$

Erstens, der dimensionslose Abstand  $cd$  des geometrischen Schwerpunkts der Kaustik  $\mathbf{x}_i$  vom Kamerazentrum  $\mathbf{x}_c$  bezogen auf den mittleren Trennflächenabstand  $sp_m$ .

$$cd = \frac{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_c)}{sp_m} \quad (3)$$

Zweitens, die dimensionslose Oberfläche der Kaustik  $cs$ , die sich aus der Oberfläche der Kaustik dividiert durch das Quadrat des mittleren Trennflächenabstands  $sp_m$  ergibt. Die Oberfläche der Kaustik ist durch die Summe der Teilflächen  $n$  bestimmt, die ihrerseits durch zwei Dreiecke approximiert werden.

$$cs = \frac{\sum_i^n 0.5 \cdot (\|P_{1,i}P_{2,i} \times P_{1,i}P_{4,i}\| + \|P_{3,i}P_{2,i} \times P_{3,i}P_{4,i}\|)}{sp_m^2} \quad (4)$$

Drittens, das dimensionslose Volumen der Kaustik  $cv$ , definiert durch den von der Kaustik aufgespannten Begrenzungsquader dividiert durch den mittleren Trennflächenabstands  $sp_m$  hoch drei.

$$cv = \frac{(\max(x) - \min(x)) \cdot (\max(y) - \min(y)) \cdot (\max(z) - \min(z))}{sp_m^3} \quad (5)$$

Viertens, die dimensionslose Raumdiagonale  $sd$ , definiert durch die Diagonale des Begrenzungsquaders dividiert durch den mittleren Trennflächenabstands  $sp_m$ .

$$sd = \frac{\sqrt{(\max(x) - \min(x))^2 + (\max(y) - \min(y))^2 + (\max(z) - \min(z))^2}}{sp_m} \quad (6)$$

## B. Schachbrettmustererkennung

Nachdem die Unterwasserkalibrierung in der Lage sein musste, Verzeichnungswerte für den gesamten Bildbereich aus einem einzigen Bild abzuleiten und die Bildverarbeitungsbibliothek *OpenCV* keinen adäquaten Algorithmus bereitstellte, wurde ein teilautomatisierter Schachbrettmustererkennungsalgorithmus konzipiert. Dieser sucht nach einem vorgegebenen Schema im gesamten Bildbereich nach Ecken des Schachbrettmusters. Für die Implementierung der bildverarbeitenden Prozesse standen Simplizität und Stabilität im Vordergrund. Die Implementierung konnte vergleichsweise einfach gehalten werden, indem die Startpunkte vom Benutzer vorgegeben wurden. Automatische Erkennungsalgorithmen, wie z.B. von Hoffmann et al. (2017) vorgestellt, wären eine sinnvolle Erweiterung. Der Erkennungsalgorithmus sollte robust auf Veränderungen der Belichtungssituation, z. B. durch leichten Wellenschlag oder im Blickfeld auftretende lokale Störungen, wie etwa vorbei schwimmende Partikel oder Luftblasen, reagieren.

Bildverarbeitende Prozesse zur subpixelgenauen Detektion der Schachbrettecken arbeiten in der Regel zweistufig (Shortis et al., 1994). Im ersten Schritt werden die Ecken grob lokalisiert und im Anschluss daran die Lage auf Subpixelgenauigkeit verbessert. Im Folgenden sind die für die Schachbrettmustererkennung implementierten Konzepte dargestellt.

Das Erkennungsverfahren benötigt drei initiale Schachbrettecken, die nach einem vorgegebenen Muster händisch auszuwählen sind. Der erste Punkt definiert den Ursprung  $P_{1,1}$  und sollte nahe des Bildursprungs liegen, der zweite die horizontal versetzt Ecke  $P_{1,2}$  und der dritte die vertikal zum Ursprung versetzte Ecke  $P_{2,1}$ . Eine grobe Auswahl der Punkte genügt, da der nachfolgend noch beschriebene Verfeinerungsalgorithmus die Lage der Schachbrettecken bis auf Subpixelgenauigkeit verbessert. Die Detektion startet in horizontaler Richtung mit der Schätzung des Punktes  $P_{1,3}$ , indem an den Punkt  $P_{1,2}$  der Vektor  $P_{1,1}P_{1,2}$  angehängt wird. An dem so abgeschätzten Ort detektiert der Verfeinerungsalgorithmus den Eckpunkt  $P_{1,3}$ . Von dort wird in analoger Weise zu  $P_{1,3}$  horizontal fortgefahren, bis der rechte Bildrand erreicht ist oder am abgeschätzten Ort keine Ecke gefunden werden konnte. Die zweite horizontale Erkennungsschleife startet am Punkt  $P_{2,1}$ , an den der Vektor  $P_{1,1}P_{1,2}$  angehängt wird. Nach Erreichen des rechten Bildrandes folgt ein vertikaler Erkennungsschritt, bei dem an den Punkt  $P_{2,1}$  der Vektor  $P_{1,1}P_{2,1}$  angehängt wird. Ab nun wechseln sich die horizontale Erkennungsschleife und der vertikale Erkennungsschritt ab, bis der rechte untere Bildrand erreicht ist. Eine Bildverkeppung hat zur Folge, dass einige Bereiche vom Algorithmus nicht erfasst werden. In Abbildung B.3 sind die Verarbeitungsschritte und die vom Algorithmus ausgesparten Bereiche veranschaulicht. Für ein optimales Ergebnis sollten Bilder möglichst parallel zu den Sensoranten aufgenommen werden. Die Kamerakalibrierung profitiert von einer subpixelgenauen Lagebestimmung der Zielmarken (Geiger et al., 2012), weshalb an verschiedensten Verfahren gearbeitet wird. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit seien einige Ansätze zur subpixelgenauen Lokalisierung der Schachbrettecken genannt: Schwerpunktmethoden (Liu et al., 2016), morphologische Ansätze (Hoffmann et al., 2017), Syntheseanalyse (Koch, 1993) und Vektor-Gradienten-Verfahren (Geiger et al., 2012). In der Herangehensweise ähneln sie sich insoweit, als dass sie mit Kenntnis der groben Lage alle weiteren Berechnungen auf den unmittelbaren Umkreis einschränken. Schwerpunktmethoden nutzen Pixelkoordinaten und Intensitätswerte, um daraus die exakte Lage abzuleiten (Liu et al., 2016). Praktische Versuche zeigten, dass sie sehr sensitiv auf den gewählten Bildausschnitt reagieren. Morphologische Ansätze segmentieren den Bildausschnitt

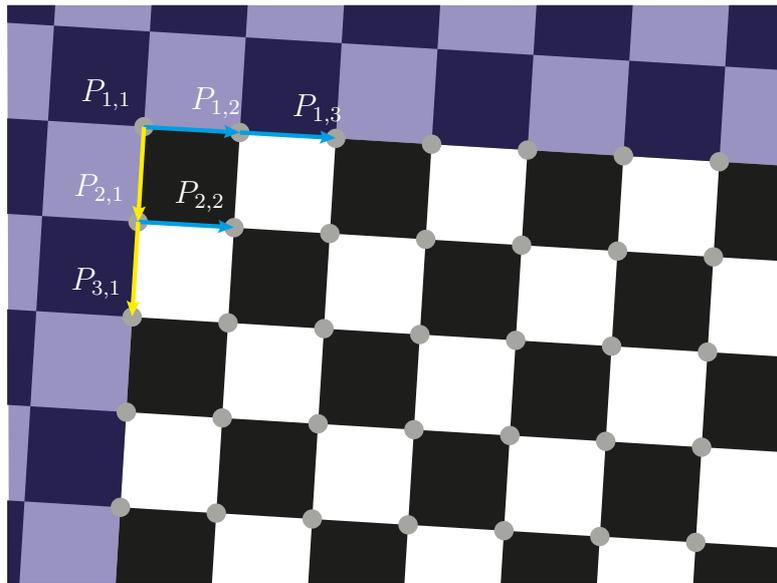


Abbildung B.3.: Visualisierung des Schachbrettmustererkennungsalgorithmus - Dargestellt sind die händisch zu selektierenden Punkte  $P_{1,1}$ ,  $P_{1,2}$  und  $P_{2,1}$ , horizontale Erkennungsschleifen in Blau, vertikale Erkennungsschritte in Gelb und die vom Algorithmus ausgesparten Bildbereiche als lila Schattierung.

durch morphologisch veränderbare Muster solange bis der Bildausschnitt sauber an den Kanten aufgetrennt ist. Diese Methodik scheint vielversprechend, wurde jedoch im Hinblick auf die aufwändigere Implementierung nicht weiterverfolgt. Unter Syntheseanalyse wird ein Verfahren verstanden, das synthetisierte Schachbrettbilder realen Aufnahmen gegenüberstellt und diese pixelweise vergleicht (Jordt, 2014). Da allerdings Unterwasserverzeichnungen erwartet wurden, die sich mit bestehenden Modellen nicht synthetisieren lassen, schied diese Methode aus. Das Vektor-Gradienten-Verfahren macht sich die Eigenschaft zu Nutze, dass ein beliebiger, vom subpixelgenauen Kreuzungspunkt ausgehender Vektor senkrecht auf dem Intensitätsgradienten des Bildes stehen muss, woraus sich ein Optimierungsproblem formen lässt (Geiger et al., 2012). Das Vektor-Gradienten-Verfahren ist als Standardalgorithmus in *OpenCV* bereits implementiert. Die subpixelgenaue Lagebestimmung führt zuerst eine Harris-Corner-Detektion für einen quadratischen Bildausschnitt, dessen Mittelpunkt der initiale Schätzwert ist, aus. Das Ergebnis der Harris-Corner-Detektion wird dann zusammen mit dem zuvor extrahierten Bildausschnitt in das Vektor-Gradienten-Verfahren gegeben, dass die subpixelgenaue Lage der Ecke berechnet. Bei Inaugenscheinahme verarbeiteter Bilddaten fiel auf, dass die detektierte Lage bei identisch wirkenden Bildern gering, aber wahrnehmbar variierte. Zur Verbesserung kann das Vektor-Gradienten-Verfahrens iterativ ausgeführt werden, wobei in jedem Iterationsschritt der Bildausschnitt neu zu fassen ist, da dieser sensitiv auf das Ergebnis wirkt. Einen ersten Eindruck, welche Verbesserungen durch die zusätzlichen Iterationsschritte erzielt werden, gibt Abbildung B.4. Mit Abbildung B.4 können die einzelnen Schritte der Lageverbesserung nachvollzogen werden, die Schätzwerte sind in Gelb, die Harris-Corner in Blau und die Lagen der iterativen Vektor-Gradienten-Verfahren in Magenta eingezeichnet. Die Auswirkungen zu geringen Kontrasts und Störung im Bildbereich führen zu einer fehlerhaften Lagebestimmung, siehe B.5b.

## Anhang

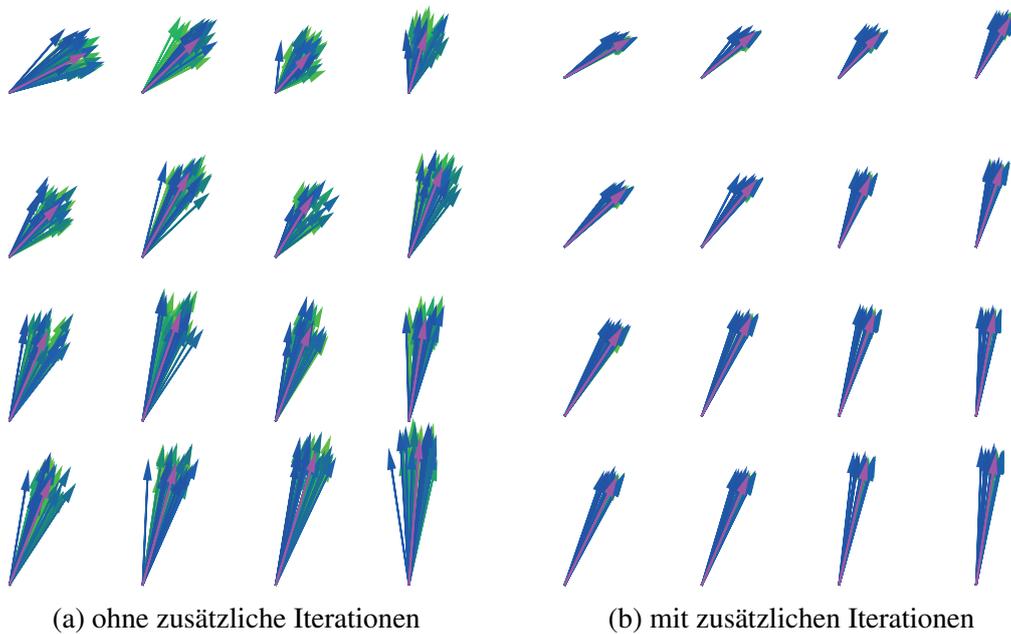


Abbildung B.4.: Gegenüberstellung der Verzeichnungswerte mit und ohne Iteration des Vektor-Gradienten-Verfahrens; die ins Verfahren gegebenen Bilder sind identisch

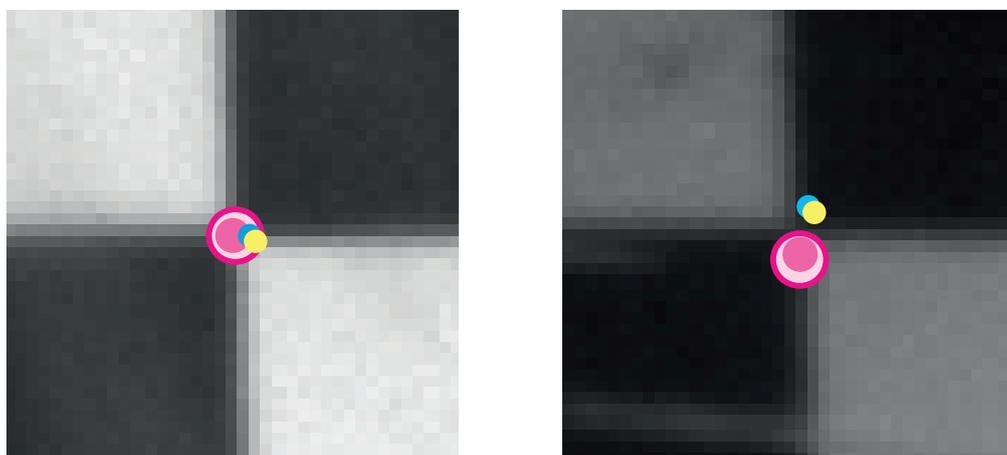


Abbildung B.5.: Iteratives Vorgehen zur subpixelgenauen Lokalisierung der Schachbrettecken. Verzeichnet sind die Schätzwerte in Gelb, die Harris-Corner in Blau und die Lagen des iterativen Vektor-Gradienten-Verfahrens in Magenta, wobei die Größe des Kreises mit dem Iterationsschritt korrespondiert

### C. Verfahren zur Bestimmung der Eintrittspupille

Die Eintrittspupille ist das objektseitige Bild der Blende und zugleich das Projektionszentrum der zentralperspektivischen Abbildung. Ein um sie rotiertes Aufnahmesystem bildet zwei hintereinanderliegende Punkte, deren Verbindungsgerade das Drehzentrum durchläuft auf nur einem Pixel ab, unabhängig vom Aufnahmewinkel. In der Panoramaphotographie werden bereits seit langem spezielle Vorrichtungen eingesetzt, die die Übereinbringung von Eintrittspupille und Drehzentrum gestatten. Zu deren Einrichtung können zwei vom Aufnahmestandort aus hintereinanderliegend erscheinende Objekte herangezogen werden. Die Kamera ist so über dem Drehpunkt zu platzieren, dass die hintereinanderliegenden Objekte aus unterschiedlichen Blickrichtungen aufgenommen, identisch erscheinen (vgl. Luhmann, 2018).

Zur Lageermittlung der Eintrittspupille entwickelte Menna et al. (2016) ein einfaches Verfahren. Zwei Kameras, die sich gegenseitig anblicken, werden auf einer Schiene montiert. Die erste Kamera trägt das Objektiv, für das die Eintrittspupille ermittelt werden soll. Die mit einem Makroobjektiv bestückte zweite Kamera wird bei offener Blende auf die Blende des anderen Objektivs fokussiert. Dann wird das Objektiv der ersten Kamera abgenommen und diese in der Objektiv-Anflanschebene mit einem Passpunktfeld versehen. Nun wird die zweite Kamera so lange verschoben, bis das Passpunktfeld scharf erscheint. Die Verschiebung definiert die Lage der Eintrittspupille im Bezug auf die Objektiv-Flanschebene (vgl. Menna et al., 2016). Die Herausforderung dieses Verfahrens besteht darin, die Positionen bei denen die Blende bzw. das Passpunktfeld scharf abgebildet sind, exakt zu ermitteln. Aufgrund der Tiefenschärfe und der subjektiven Einschätzung von Schärfe wird dies immer gewissen Schwankungen unterliegen sein.

Heigermoser (2020) entwarf im Rahmen einer begleitenden Masterarbeit ein Verfahren zur genauen Bestimmung der Eintrittspupille, das die Idee der Panoramaphotographie aufgreift. Er platzierte die Kamera auf einem drehbar gelagerten Arm, auf dem die Kamera axial verschoben werden konnte. Der Drehpunkt des drehbaren Armes war mittig auf einer Schiene befestigt an der sich auch die zwei hintereinanderliegenden Objekte befanden. Mit diesem Verfahren kann die Lage der Eintrittspupille bis auf ein Zehntel Millimeter genau bestimmt werden. Heigermoser (2020) zeigt, dass für die eingesetzten Objektive *Basler-TS1214* die Lage der Eintrittspupille von der fokussierten Aufnahmedistanz abhängt und ermittelte für den Distanzbereich von 0,1 m bis 1,0 m eine lineare Eintrittspupillen-Verschiebung von 3,5 mm.

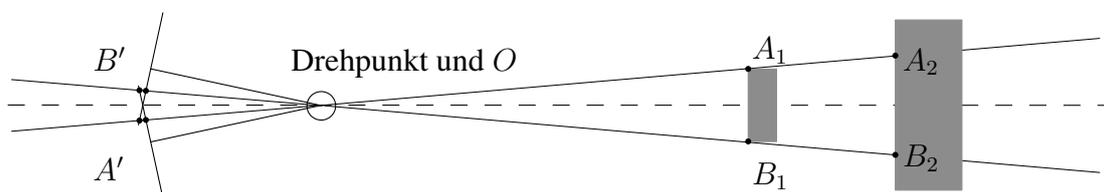


Abbildung C.6.: Aufnahmen eines um das Projektionszentrum  $O$  gedrehten Aufnahmesystems, das die hintereinanderliegenden Punkte  $A_1, A_2$  und  $B_1, B_2$ , deren Verbindungsgerade durch das Drehzentrum läuft, in jeweils nur einem Bildpunkt  $A'$  und  $B'$  abbildet

## **D. Ergebnisse**

### **D.1. Trendbereinigte Sohlhöhen**

In den Abbildungen D.7 und D.8 sind für verschiedene Zeitpunkte der Langzeitversuche die trendbereinigten Sohlhöhen und die lokalen Standardabweichungen zusammengestellt.

### **D.2. Mittlere Sohle**

In den Abbildungen D.9 bis D.12 sind für verschiedene Zeitpunkte der Langzeitversuche die mittlere Sohle, die Sohlentwicklung, die Gradienten und die Krümmungen der Sohloberfläche dargestellt.

Anhang

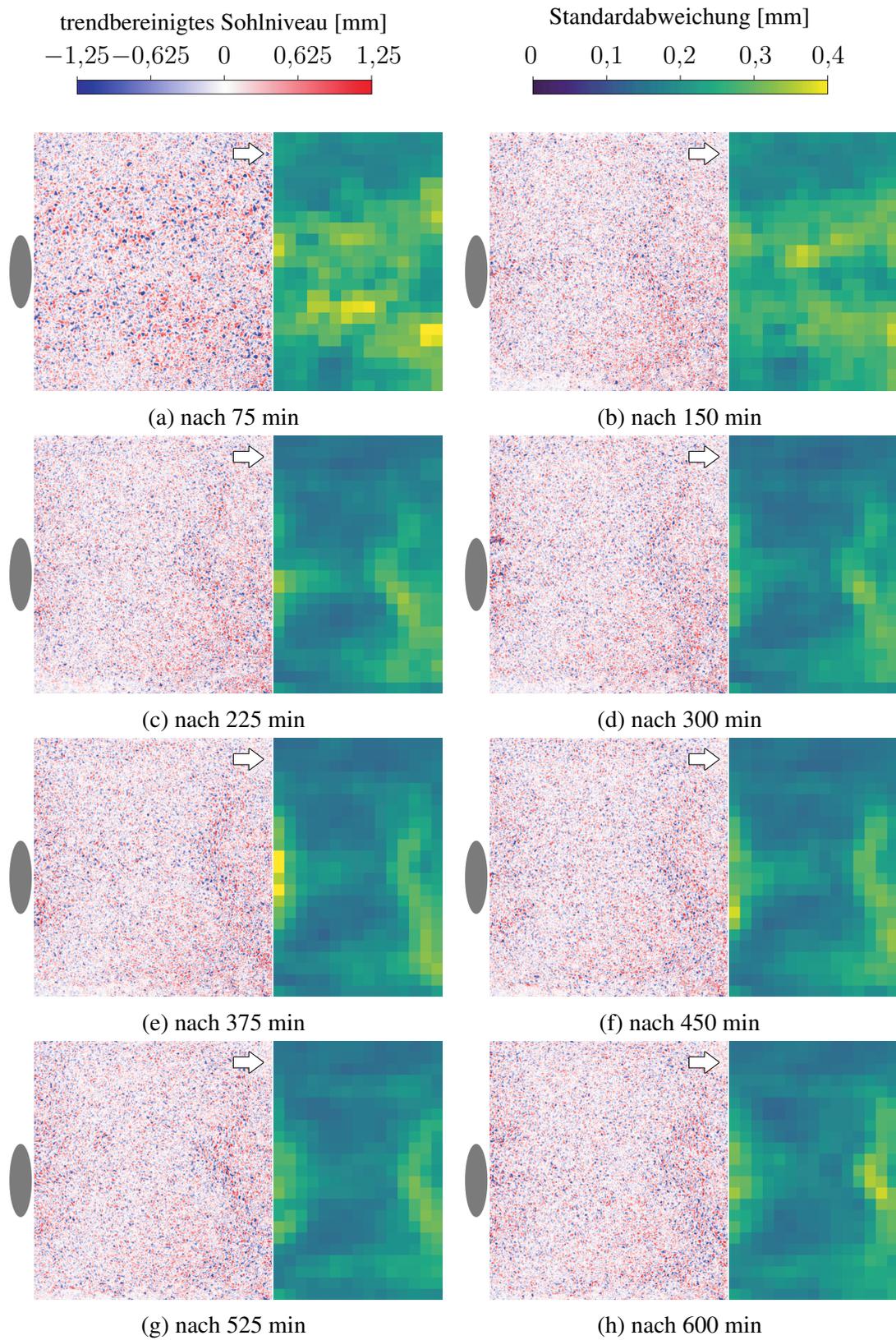


Abbildung D.7.: Trendbereinigte Sohlhöhen und lokale Standardabweichungen der Versuche mit Einkornmaterial

Anhang

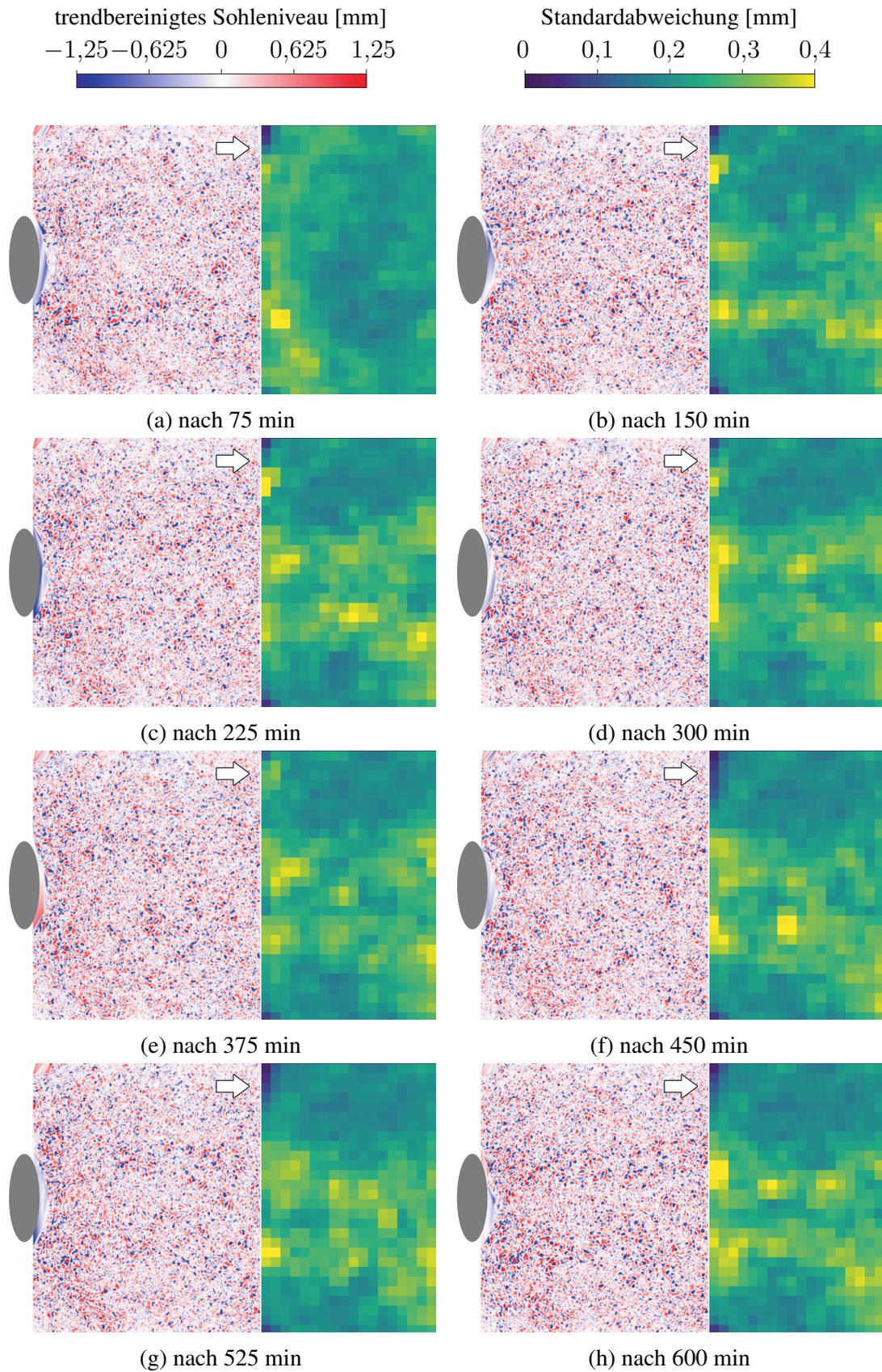


Abbildung D.8.: Trendbereinigte Sohlhöhen und lokale Standardabweichungen der Versuche mit Mehrkornmaterial

## Anhang

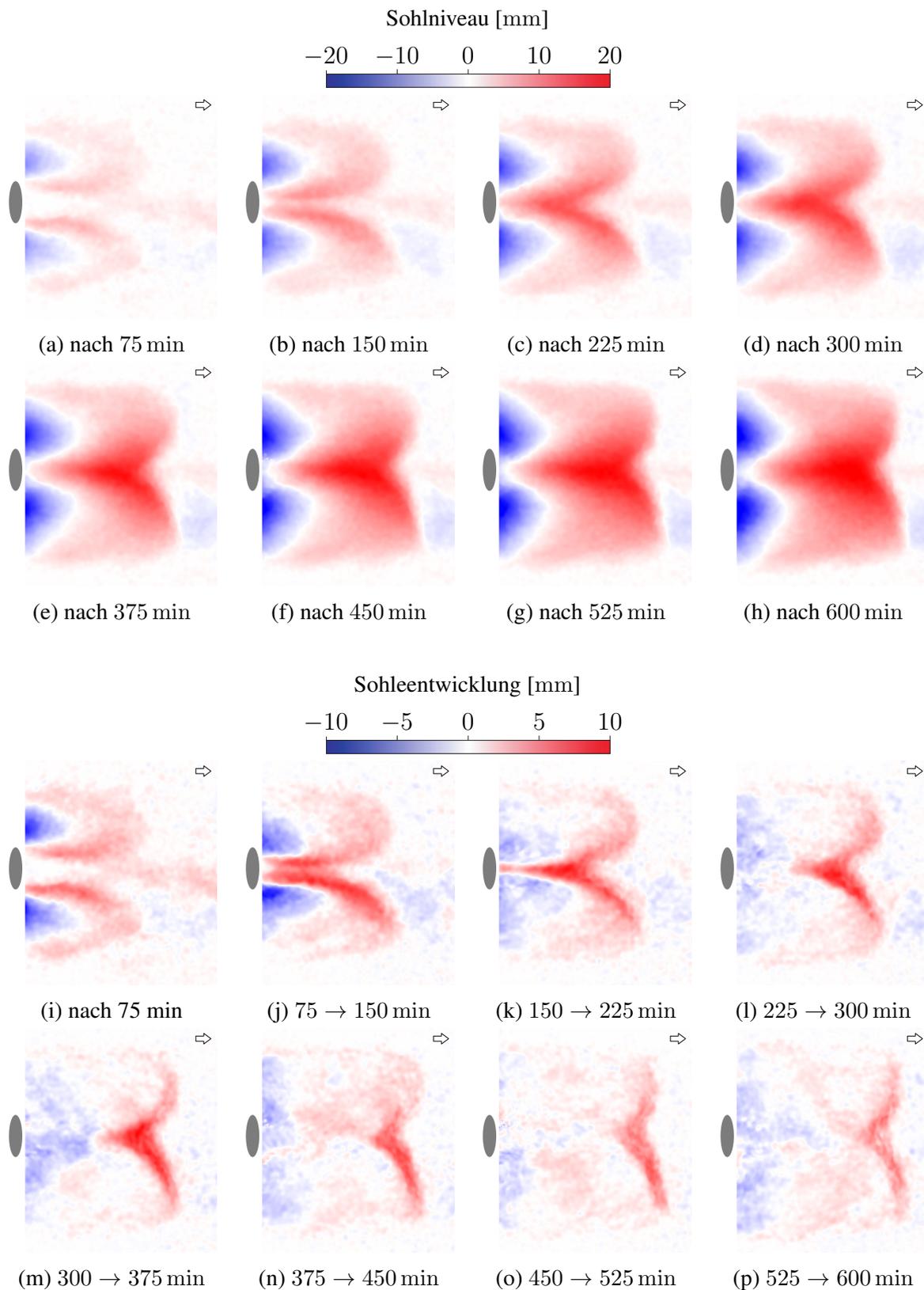


Abbildung D.9.: Versuche mit Einkornmaterial - In den Teilabbildungen D.9a bis D.9h sind die mittleren Sohllagen zu verschiedenen Aufnahmezeitpunkten dargestellt. In den Teilabbildungen D.9i bis D.9p sind die mittleren Sohleentwicklungen zu verschiedenen Aufnahmezeitpunkten dargestellt.

## Anhang

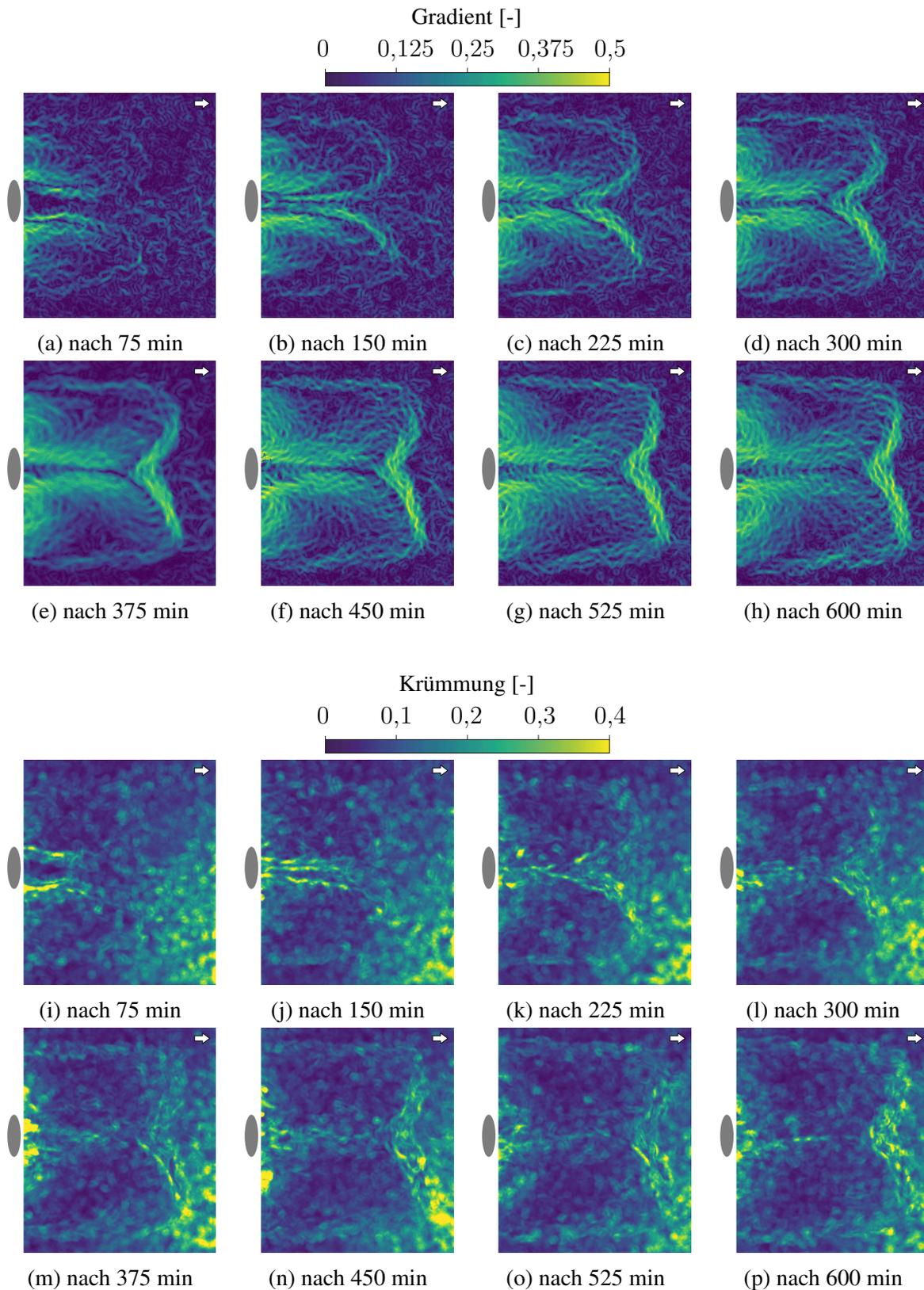


Abbildung D.10.: Versuche mit Einkornmaterial - In den Teilabbildungen D.10a bis D.10h sind die Gradienten der mittleren Sohlagen zu verschiedenen Aufnahmezeitpunkten dargestellt. In den Teilabbildungen D.10i bis D.10p sind die Krümmungen der mittleren Sohlentwicklungen zu verschiedenen Aufnahmezeitpunkten dargestellt.

## Anhang

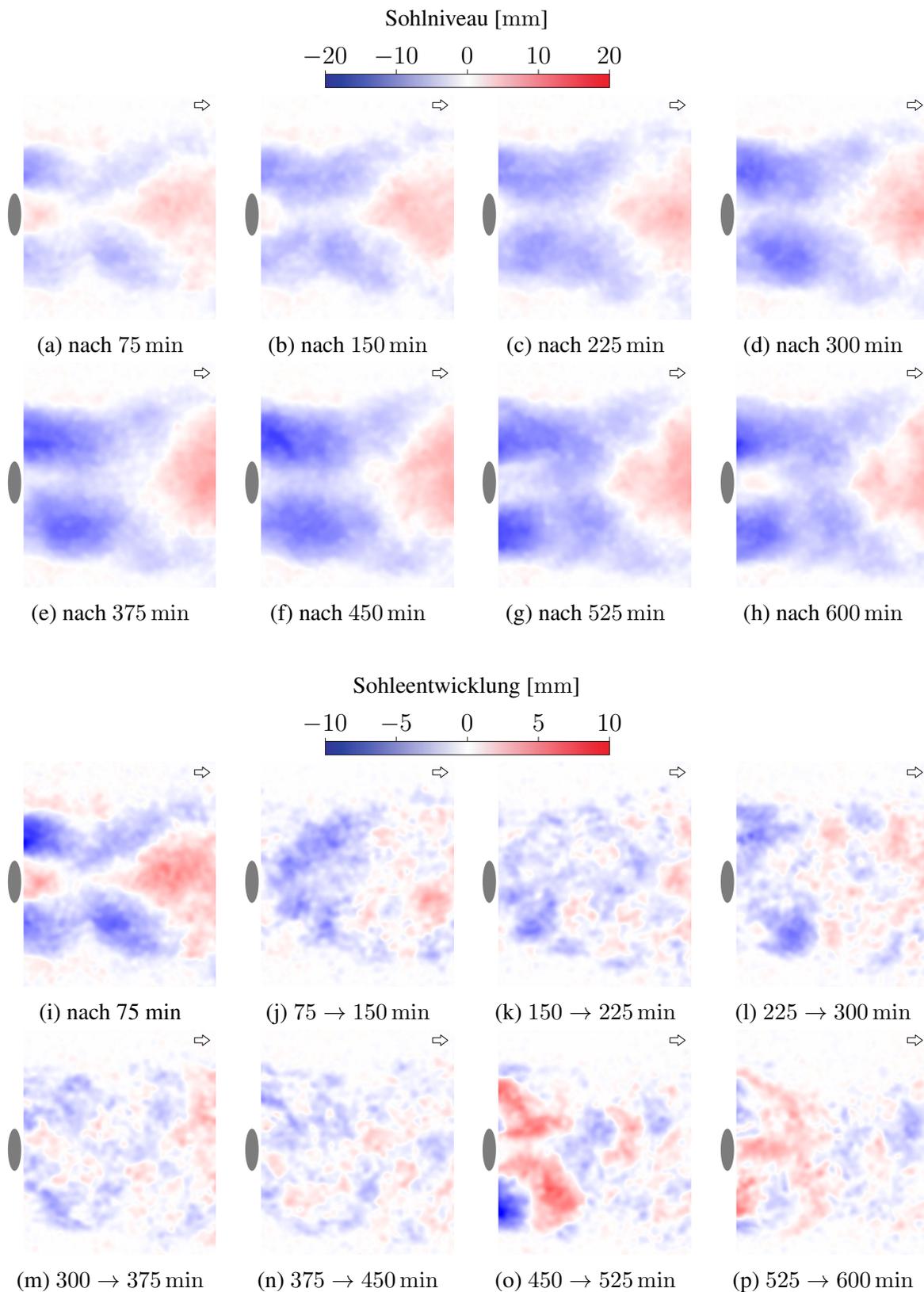


Abbildung D.11.: Versuche mit Mehrkornmaterial - In den Teilabbildungen D.11a bis D.11h sind die mittleren Sohlagen zu verschiedenen Aufnahmezeitpunkten dargestellt. In den Teilabbildungen D.11i bis D.11p sind die mittleren Sohleentwicklungen zu verschiedenen Aufnahmezeitpunkten dargestellt.

## Anhang

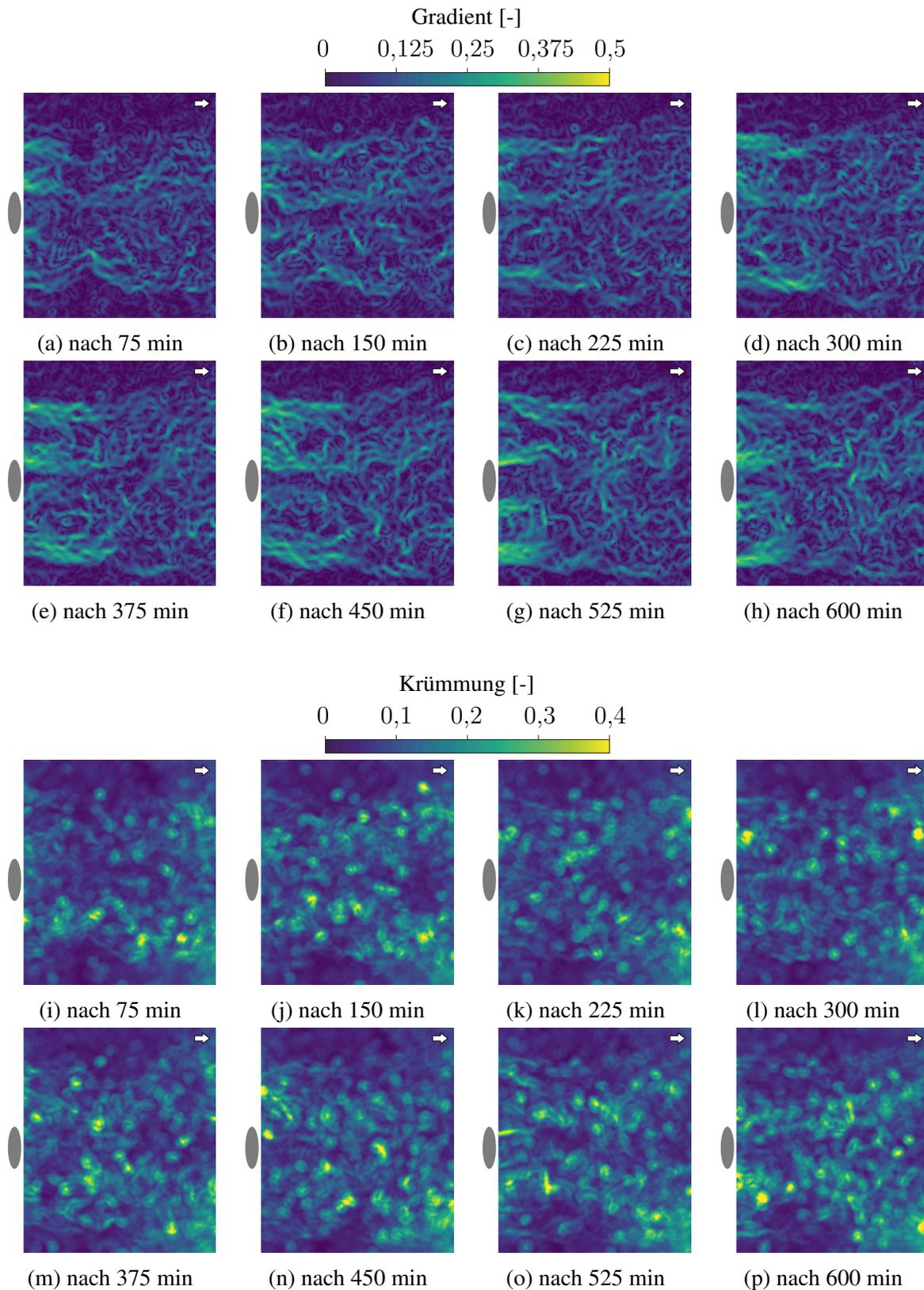


Abbildung D.12.: Versuche mit Mehrkornmaterial - In den Teilabbildungen D.12a bis D.12h sind die Gradienten der mittleren Sohlagen zu verschiedenen Aufnahmezeitpunkten dargestellt. In den Teilabbildungen D.12i bis D.12p sind die Krümmungen der mittleren Sohlentwicklungen zu verschiedenen Aufnahmezeitpunkten dargestellt.

# Symbolverzeichnis

## Abkürzungen

<b>Symbol</b>	<b>Beschreibung</b>
ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler
CFD	Computational Fluid Dynamics
CT	Computertomographie
LED	Licht emittierende Dioden
PIV	Particle Image Velocimetry
PTV	Particle Tracking Velocimetry
SfM	Structure from Motion

## Wichtigste Symbole und Formelzeichen

<b>Symbol</b>	<b>Einheit</b>	<b>Beschreibung</b>
$\theta_l, \theta_i, \theta_e, \theta_w$	[°]	Einfalls- und Ausfallswinkel
$b_f, b, b_n$	[mm]	Bildweiten (fern, normal, nah)
$c$	[-]	Kamerakonstante
$C_U$	[-]	Unförmigkeitszahl
$K_1, K_2, K_3$	[-]	radialsymmetrische Verzeichnungparameter
$P_1 - P_4$	[-]	tangentiale Verzeichnungparameter
$d_g, d_o$	[mm]	Abstände bzw. Wandstärken (Glas, Objekt, etc.)
$d_m, d_{90}, d_{16}$	[mm]	Korndurchmesser (mittlere, 90 %-Fraktile, 16 %-Fraktile, etc.)
$dz_m, dz_{max}$	[mm]	Abweichungen (mittel, maximal, etc.)
$f$	[mm]	Brennweite
$g_f, g, g_n$	[mm]	Gegenstandsweiten (fern, normal, nah)
$k$	[-]	Blendenzahl
$m$	[-]	Bildmaßstabszahl
$O'$	[m]	Projektionszentrums

## Symbolverzeichnis

$s$	[mm]	Standradabweichung
$t$	[mm]	Tiefenschärfe
$x'_p, y'_p$	[Pixel]	Bildraumkoordinaten
$x'_0, y'_0$	[Pixel]	Bildhauptpunkt
$X, Y, Z$	[m]	Objektraumkoordinaten
$z$	[mm]	Unschärfekreisradius