

Karlsruher Schriften
zur Anthropomatik

Band 26



Philipp Woock

**Umgebungskartenschätzung aus
Sidescan-Sonardaten für ein
autonomes Unterwasserfahrzeug**

Philipp Woock

**Umgebungskartenschätzung aus Sidescan-Sonardaten
für ein autonomes Unterwasserfahrzeug**

Karlsruher Schriften zur Anthropomatik
Band 26
Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Beyerer

Eine Übersicht aller bisher in dieser Schriftenreihe
erschienenen Bände finden Sie am Ende des Buchs.

Umgebungskartenschätzung aus Sidescan-Sonardaten für ein autonomes Unterwasserfahrzeug

von
Philipp Woock

Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Fakultät für Informatik, 2015

Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark of Karlsruhe
Institute of Technology. Reprint using the book cover is not allowed.

www.ksp.kit.edu



*This document – excluding the cover, pictures and graphs – is licensed
under the Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 DE License
(CC BY-SA 3.0 DE): <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/>*



*The cover page is licensed under the Creative Commons
Attribution-No Derivatives 3.0 DE License (CC BY-ND 3.0 DE):
<http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/de/>*

Print on Demand 2016

ISSN 1863-6489

ISBN 978-3-7315-0541-9

DOI 10.5445/KSP/1000055793

Umgebungskartenschätzung aus Sidescan-Sonardaten für ein autonomes Unterwasserfahrzeug

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften

der Fakultät für Informatik
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Inform. Philipp Woock

aus Ellwangen (Jagst)

Tag der mündlichen Prüfung:	07. Dezember 2015
Erster Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Beyerer
Zweiter Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Rauschenbach

Kurzfassung

Die Arbeit beschäftigt sich mit der Erzeugung von Höhenkarten des Meeresbodens aus Sonardaten eines bildgebenden Sonars am Beispiel eines Sidescan-Sonars in der Tiefsee. Diese bathymetrische Information lässt sich aus den Sonardaten nur indirekt gewinnen, da nur Schallintensitäten über der Zeit gemessen werden und keine Abstandsinformation. Daten eines bildgebenden Sonars erlauben einem geübten menschlichen Operator mit bloßem Auge Aussagen über die Gestalt des Meeresbodens zu machen. Dieser Vorgang soll zukünftig automatisiert ohne menschliche Interaktion von statten gehen. Die entstehenden Höhenkarten sollen letztlich dazu dienen, die Genauigkeit der Navigation eines autonomen Unterwasserfahrzeugs durch Wiedererkennung von Orten zu erhöhen.

Die Arbeit leistet mehrere Teilbeiträge zur Sidescan-Sonardatenverarbeitung. Ein Beitrag der Arbeit besteht aus der Schaffung einer Simulationsumgebung für Sidescan-Sonardaten, die in der Lage ist, verschiedene Terraintypen zu modellieren, die dreidimensionale Abstrahlcharakteristik eines Sonarsensors zu berücksichtigen und verschiedene Sonaraufnahmemodi zu simulieren. Besonders hervorzuheben ist die Tatsache, dass die Simulationsumgebung die Sonaraufnahme für voll dreidimensionale Szenen modellieren kann und nicht nur Höhenkarten berücksichtigt.

Für die Schätzung der Höhenkarten aus Sidescan-Sonardaten liefert die Arbeit drei Beiträge: Ein bestehendes Schätzverfahren für Daten einer Geradeausfahrt wurde für die Auswertung der Daten aus Kurvenfahrten ertüchtigt. Die kritische Berechnung der Oberflächengradienten erfolgt dafür auf einer Punktwolkenrepräsentation, die an die extrem ungleich verteilte Sampledichte in der Bodenebene angepasst ist.

Den Hauptteil der Arbeit bildet ein neues Schätzverfahren, das Sonarmessungen aus vorberechneten Sonarantworten von Basiselementen, sog. Kernen, zusammensetzt. Durch die Entsprechungen der Kernel im Ortsbereich wird für jede Messung ein Höhenprofil gewonnen. Diesen kernelbasierten Einzellinien-Höhenprofilen wird gemäß der Strahlaufweitung des Sonars eine Unsicherheit in Fahrtrichtung zugeordnet. Dann werden die so erweiterten Kernel entsprechend der Fahrzeugeigenbewegung in eine globale Karte

eingetragen und mit anderen Schätzungen aus anderen Messungen über ein Distanzmaß zu einer Gesamtkarte fusioniert.

Der dritte Beitrag besteht aus der Übertragung eines aktuellen Verfahrens aus dem optischen inversen Raytracing auf die Sonardomäne. Das Verfahren sucht auf einem Voxelgitter eine Maximum-a-posteriori-Belegung mithilfe von Loopy Belief Propagation, die die Meeresbodenoberfläche konsistent zu den Messungen wiedergibt. Dazu musste der Nachrichtenaustausch auf dem zugrundeliegenden Faktorgraphen an die stark unterschiedliche Datenaufnahme beim Sonar im Vergleich zur optischen Aufnahme angepasst werden. Im Gegensatz zu den eindimensionalen RayMRF-Faktoren des optischen Verfahrens, mussten dafür zweidimensionale »BeamMRF«-Faktoren mit den zugehörigen Nachrichten definiert werden.

Abstract

This work deals with the creation of elevation maps from data of an imaging sonar, in particular a sidescan sonar in the deep sea. The bathymetric information can be extracted from the data only indirectly as only echo intensity values over time are measured. Data of an imaging sonar allow a human operator to estimate the shape of the seafloor. In the course of ever increasing automation, this task needs to be done without human interaction. The resulting elevation maps of the surroundings may then be used to aid navigation of an autonomous underwater vehicle by recognition of already known places.

This work makes several contributions to sidescan sonar data processing. One contribution is in the area of sidescan sonar data simulation. The created simulator is capable of creating several different terrain shapes, supports a three-dimensional beam pattern of the sonar sensor and models various sonar recording modes. A highlight of the simulator is the ability to model full three-dimensional scenes and not just heightmaps.

Regarding the estimation of elevation maps from sidescan sonar data, this work makes three contributions: An existing estimation method for data from straight trajectories is extended to curved trajectories. To achieve that, the critical computation of surface gradients is performed on a point cloud representation that has been adapted to cope with the extremely uneven distribution of samples in the ground plane. The main part of this work comprises a new estimation method that recreates a sonar measurement from pre-calculated sonar responses of basis elements called »kernels«. The shapes of the matching kernels correspond to a height profile for each measurement line. These kernel-based line profiles are extended to the other dimension by the amount of beam widening of the sonar. The resulting extended kernels are then placed in a global map using the corresponding vehicle pose. In that global map, they are fused with kernels from other measurements by evaluation of a distance measure. The third contribution is the application of a current method from optical inverse ray tracing to the sonar domain. The method uses a voxel grid and finds the bottom shape that maximises the posterior probability by loopy belief propagation that best encodes the seafloor shape under consideration of the measurements. Due to the very

different recording properties of an imaging sonar to a camera, the message passing for the associated factor graph had to be remodeled for the sonar domain. This involves the definition of two-dimensional »BeamMRF« factors opposed to the one-dimensional RayMRF factors of the optical method.

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Interaktive Echtzeitsysteme (IES) am Karlsruhe Karlsruher Institut für Technologie (KIT) in enger Kooperation mit dem Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung (IOSB) in Karlsruhe.

An erster Stelle gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Beyerer für die vorbildlich motivierte Betreuung meiner Arbeit durch seine zahlreichen Anregungen und Diskussionsbeiträge. Die regelmäßigen Werkstattgespräche am Lehrstuhl wie auch die jährlichen Sommerseminare gaben mir die Möglichkeit, meinen Horizont nicht nur im Rahmen meiner eigenen Arbeit zu erweitern, sondern auch in andere Themenstellungen des Lehrstuhls einzutauchen. Dieser Blick über den Tellerrand sorgte dafür, dass ich den Kontakt zu anderen Forschungsthemen nicht verlieren konnte.

Meinem Korreferenten Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Rauschenbach danke ich für die Übernahme des Korreferats und für die tiefen Einblicke in den Bau und Betrieb von autonomen Unterwasserfahrzeugen. Besonders zu schätzen wusste ich die immer ausgesprochen angenehme Atmosphäre und die produktive wissenschaftliche Zusammenarbeit in gemeinsamen Projekten.

Für die wertvollen Diskussionen und gemeinsamen Experimente möchte ich mich bei Dr. Alexey Pak bedanken. Bei unseren wissenschaftlichen Diskussionen war er jederzeit mit großer Begeisterung dabei und konnte mir dadurch wertvolle Hinweise für die Arbeit geben. Durch seine scharfsinnige Beobachtungsgabe und seine Diskussionsbeiträge profitiert der ganze Lehrstuhl.

Am Fraunhofer IOSB möchte ich mich zuallererst bei Christian Frey bedanken, der mir die Promotionsstelle ermöglicht hat und mir nach Kräften Freiräume für die Arbeit an der Dissertation geschaffen hat. Außerdem bekam ich von ihm viele praxisrelevante Tipps zum Themenkomplex »Anträge und Projektmanagement«.

Ich möchte mich bei der ganzen Abteilung Mess-, Regelungs- und Diagnosesysteme (MRD) am Fraunhofer IOSB bedanken, in die ich als Doktorand eingebettet war. Die Kollegialität ist vom Abteilungsleiter Prof. Dr.-Ing. Michael

Heizmann bis hinab zum »normalen« Wissenschaftler vorbildlich und sorgt für eine gute Arbeitsatmosphäre. Auch für die Hilfe über Abteilungsgrenzen am IOSB hinweg möchte ich mich bedanken, wobei Kai Niedernberg keinesfalls unerwähnt bleiben darf. Er hat die elektronischen Innereien meiner Tiefsee-Glaskugel unermüdlich bei jeder Hardwareänderung sorgfältig und dennoch rasend schnell neu verlötet. Aber auch die reibungslose Zusammenarbeit mit hier nicht namentlich genannten Kollegen am IOSB ist nicht selbstverständlich und eine dankende Erwähnung wert.

Auch die Atmosphäre am Lehrstuhl war von großer Kollegialität geprägt. Ein Dankeschön an alle Mitstreiter dort! Besonders hervorheben möchte ich jedoch Frau Gross im Sekretariat des Lehrstuhls. Ihre Freundlichkeit und Hilfsbereitschaft an gefühlt 26 Stunden am Tag an bestimmt mehr als 400 Tagen im Jahr ☺ ist unersetzlich und bleibt dem Lehrstuhl hoffentlich noch lange erhalten.

Besonders große Hilfsbereitschaft habe ich insbesondere bei folgenden Kollegen erfahren dürfen, weshalb ihnen ein namentlicher Dank zugeht: Janko Petereit für seine profunden Kenntnisse auf vielen Gebieten (unter anderem in C++ und Typographie), Thomas Emter für die Diskussionen und seine Unterstützung bei allem, was mit Wellen und SLAM zu tun hat, Thomas Stephan für die Einblicke in die optische Unterwasserwelt, Angelika Fetzner, Mathias Ziebarth, Dr. Christian Frese, Tianyi Guan, Peter Frühberger, Alexander Albrecht, Miriam Ruf und insbesondere Dr. Yvonne Fischer für ihre Hilfsbereitschaft zu jeder Zeit.

Ein besonders herzlicher Dank ergeht an die Korrekturleser der Arbeit. Ohne die wertvollen Rückmeldungen hätte die Arbeit nicht die Qualität, die sie jetzt hat.

Im Rahmen des TIETeK-Projekts danke ich den Kollegen des Fraunhofer IOSB-AST in Ilmenau: Dr. Torsten Pfützenreuter, Helge Renkewitz und Sebastian Matz sowie Franz Josef Becker, Christian Degel und Michael Ehrhardt vom Fraunhofer IBMT in St. Ingbert für die gute Zusammenarbeit.

Für lange Diskussionen über Details seines Rekonstruktionsverfahrens möchte ich mich bei Enrique Coiras herzlich bedanken, der mir geduldig viele Fragen beantwortet hat, obwohl er die Unterwasserwelt inzwischen zu anderen Ufern verlassen hat.

Ferner möchte ich mich bei Konstantinos Siantidis, Stefan Leier, David Rose, Yan Pailhas und Johannes Groen für ihre anregenden Diskussionen auf verschiedenen Konferenzen zur Unterwasserakustik bedanken.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie für ihre Unterstützung während des Studiums und der Promotionszeit bedanken. Ein riesengroßes Dankeschön gilt dabei meiner Frau, die mir in der Promotionszeit mit ihrem Organisationstalent viele Freiräume geschaffen und mich entlastet hat, wann immer möglich. Ohne Dich hätte das alles nicht funktioniert!

Stutensee, im September 2015

Philipp Woock

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Abstract	III
Danksagung	V
Symbolverzeichnis	XV
1 Einführung	3
1.1 Motivation und Zielsetzung	3
1.2 Eigene Beiträge	4
1.3 Gliederung	7
2 Die Weltmeere als Interessengebiet	9
2.1 Rohstoffe	9
2.1.1 Unterwasser-Bergbau	9
2.1.2 Manganknollen	10
2.1.3 Massivsulfide	11
2.1.4 Kobaltkrusten	11
2.1.5 Gashydrate	12
2.1.6 Erdöl und Erdgas	13
2.2 Inspektionsaufgaben	13
2.2.1 Kabel	14
2.2.2 Öl- und Gasförderung	14
2.3 Militärische Interessen	15
2.4 Bau von Unterwasseranlagen	15
2.5 Maritime Souveränität	16
2.6 Fischerei	17
2.7 Biologische Forschung	17
2.8 Existierendes Kartenmaterial	19
2.9 Bezeichnungen und Meerestiefen	19
3 Schallausbreitung unter Wasser	21
3.1 Einführung	21

3.2	Schallgeschwindigkeit	22
3.2.1	Schallgeschwindigkeitsprofil	22
3.3	Akustische Wellengleichung	24
3.3.1	Numerische Näherungen der Wellengleichung	26
3.3.2	Dezibelnotation und Referenzlevel	28
3.3.3	Schalldruck und Intensität	28
3.4	Ausbreitungsverlust	29
3.4.1	Geometrische Ausbreitungsdämpfung	29
3.4.2	Einfluss des Mediums	30
3.4.3	Schallkanäle und Deep Scattering Layer	34
4	Schall an Grenzflächen	37
4.1	Snell-Descartes'sches Brechungsgesetz an Schichtgrenzen	37
4.2	Reflexion und Streuung	39
4.2.1	Akustische Impedanz	39
4.2.2	Impedanzkontrast und Reflexionskoeffizient	39
4.2.3	Spiegelnde Reflexion und Rauheit	41
4.2.4	Eindringtiefe und Frequenz	42
4.2.5	Rückstreuung der Oberfläche	43
4.2.6	Lambert'sches Gesetz	47
4.2.7	Weitere Oberflächenrückstreumodelle	50
4.2.8	Sonargleichung	53
4.3	Mehrwegeausbreitung	55
5	Störungen	57
5.1	Umgebungsrauschen	57
5.2	Eigengeräusch	58
5.3	Biologisch erzeugtes Rauschen	58
5.4	Rauschreduktion	59
5.5	Clutter	59
5.6	Sonar als kohärentes Abbildungssystem	60
6	Sonarsensorik	61
6.1	Warum nicht optische Sensorik?	61
6.1.1	Kameras und Lichtausbreitung	61
6.1.2	Gated viewing	62
6.1.3	Laserscanner	62

6.2	Akustische Sensorik	63
6.2.1	Aktives und passives Sonar	63
6.2.2	Bildgebende und profilbildende Sonarsensoren	63
6.2.3	Signalerzeugung	64
6.3	Gerätetypen und Aufnahmeprinzip	66
6.3.1	Richtungsdefinitionen	66
6.3.2	Vom Handlot zum Echolot	67
6.3.3	Sidescan-Sonar	68
6.3.4	Multi-Beam/Multi-Angle Sidescan-Sonar	80
6.3.5	Mechanically Scanning Imaging Sonar	81
6.3.6	Forward-looking Sonar	82
6.3.7	Synthetisches Apertursonar	83
6.3.8	Interferometrisches Sidescan-Sonar	86
6.3.9	Interferometrisches SAS	88
6.3.10	Scannendes Pencil-Beam Sonar	88
6.3.11	Multibeam-Echosounder / Fächerecholot	89
6.3.12	Subbottom-Profilier	90
6.3.13	3D-Sonare	91
6.3.14	Parametrisches Sonar	91
6.3.15	Breitbandsonar	92
6.4	Biologischer Einfluss	93
7	Stand der Technik und Forschung	
	zur Sonardatenverarbeitung	95
7.1	AUV Lokalisierung und Navigation	96
7.1.1	Koppelnavigation	96
7.1.2	Stützung der Koppelnavigation	97
7.1.3	Zustandsschätzer	97
7.1.4	Absolute Referenzierung	98
7.1.5	Passive künstliche Landmarken	100
7.1.6	Terrain-relative Referenzierung	100
7.2	Bildbasierte Sonardatenverarbeitung	101
7.2.1	Geometrische Korrekturen und Mosaicing	103
7.2.2	Bildfusion	105
7.2.3	Merkmalsverfolgung (Tracking)	106
7.2.4	Klassifizierung	107

7.3	SLAM in Unterwasser-Anwendungen	109
7.3.1	SLAM-Verfahren auf Sidescan-Sonardaten	109
7.3.2	SLAM-Verfahren auf Daten rotierender bildgebender Sonare	112
7.3.3	SLAM-Verfahren auf Daten vorwärts schauender bildgebender Sonare	113
7.3.4	SLAM-Verfahren auf anderen Sonardaten	116
7.4	Fusion von Kamera- und Sonardaten	119
7.5	Rein kamerabasierte Unterwasser-Anwendungen	121
7.6	Schallbasierte Navigation über Wasser	122
7.7	Sonarsimulation	123
7.7.1	Übersicht	123
7.7.2	Überblick über Sonarsimulatoren	124
7.7.3	PSTD-basierte Simulationen	130
7.7.4	Simulation der Rückstreuung	131
7.7.5	Meeresbodenmodellierung	131
7.8	Umgebungsrekonstruktion aus Sonardaten	134
7.8.1	Sonarschatten	134
7.8.2	Shape from shading	134
7.8.3	Andere Ansätze	139
7.9	Fazit	142
8	Simulation von Sidescan-Sonardaten	143
8.1	Einführung	143
8.2	1D-Simulationsumgebungen	143
8.2.1	Profillinien-Simulationsumgebung	143
8.2.2	Punktwolkenbasierte Simulationsumgebung	146
8.3	3D-Sonarsimulation	147
8.3.1	Gewinnung geometrischer Information	150
8.3.2	Bodenmodellierung	154
8.3.3	Akustische Modellierung	162
8.3.4	Laufzeit	189
8.3.5	Fazit und Vergleich	190
9	Sonardatenauswertung	193
9.1	Einfluss von Eigenbewegung auf Sonardaten	193
9.1.1	Einfluss des Nickwinkels	193

9.1.2	Einfluss des Gierwinkels	193
9.1.3	Einfluss des Rollwinkels	194
9.1.4	Einfluss der Flughöhe über Grund	195
9.2	Das Rekonstruktionsproblem	198
9.3	Rekonstruktion – ein Inverses Problem	200
9.3.1	Inversion als Optimierungsproblem	201
9.4	Eigene Arbeiten zur Rekonstruktion	202
9.4.1	Kreisbogenmodell	202
9.4.2	Erweiterung eines pixelbasierten Rekonstruktionsverfahrens	206
9.4.3	Rekonstruktion mittels Kernelalphabeten	213
9.4.4	Rekonstruktionsverfahren (MRF, BP)	234
9.4.5	Salienzmerkmal für Punktwolken	250
10	Bewertung	253
10.1	Erweiterung des pixelbasierten Verfahrens	253
10.2	1D-Kernelverfahren	253
10.2.1	Alphabetparameter	254
10.2.2	3-Kernel-Oberfläche	255
10.3	2,5D-Kernelverfahren	262
10.3.1	Testterrain	262
10.3.2	Parabel-Trajektorie	263
10.3.3	Box-Trajektorie	265
10.4	Synthetische Auswertung des MRF-Verfahrens	269
11	Zusammenfassung und Ausblick	281
11.1	Zusammenfassung	281
11.2	Ausblick	282
11.2.1	Simulation	282
11.2.2	Rekonstruktionsverfahren	283
	Literaturverzeichnis	287
	Eigene Veröffentlichungen	315
A	Absorption in Seewasser	317

B Genauigkeitsanforderungen	319
B.1 Welche Auflösung ist nötig für Target-Erkennung?	319
B.2 Kommerzielle Kartierung	319
B.2.1 Total Propagated Uncertainty (TPU)	319
B.2.2 S44-IHO Datenqualität	320
C Rayleigh-Statistik für schmalbandiges Rauschen	323
D MRF-Energiedefinitionen nach Liu	325
E Was man bei der Promotion <i>wirklich</i> lernt	327
Stichwortverzeichnis	329

Symbolverzeichnis

Allgemeine Notation

$*$	Faltung
$A, B, C \dots$	Matrizen
$\mathcal{A}, \mathcal{B}, \mathcal{C} \dots$	Mengen
\cdot^T	transponiert
\cdot^{-T}	Inverse Transponierte einer quadratischen Matrix
$a, b, c \dots$	Vektoren

Kalligrafische und Frakturzeichen

\mathcal{B}	Menge an Sonarmessungen
\mathcal{D}	Menge, die Positionstupel mit Beginn und Ende eines Schattenbereichs im Sonarsignal enthält
\mathcal{E}	MRF-Energieterm
\mathcal{F}	Fouriertransformation
\mathcal{G}	Grundwahrheitsmenge an Kernen
\mathcal{H}	Menge, die Schlaglichtpositionen im Sonarsignal enthält
\mathcal{K}	Ergebnismenge der Kernelschätzung
\mathbf{m}	Index für die momentenerhaltende Mischverteilung
\mathcal{N}'_6	6-Nachbarschaft außerhalb des vordefinierten Kernel-Parameterraums
\mathbf{p}	Kernel-Parametervektor
\mathcal{S}	Abbildung vom Ortsbereich in den Sonarbereich, Vorwärtsmodell
\mathbf{u}	Indexvektor im Kernel-Parameterraum
\mathcal{U}	Support eines Kernels in der Sonardomäne

Griechische Zeichen

α	Absorptionskoeffizient
α_a	Anisotropieparameter bei der Bodenmodellierung
β_m	Sonarbefestigungswinkel
β	Rauschparameter für Rauschen nach dem Potenzgesetz (power law noise)
γ	Virtueller Sonaröffnungswinkel in der Bodenprojektion
Γ	Rayleigh'scher Rauheitsparameter
Γ_p	Richtfaktor
δ	Kronecker-Symbol
η	3 dB Faktor, etwa 0,89
$\eta(\theta_i)$	Gestreuter Anteil der einfallenden Schalleistung
κ	Stärke des Frequenzanstiegs im Chirp
λ	Wellenlänge
μ	Mittelwert
$\boldsymbol{\mu}$	Mittelwertvektor
ξ	Position des Gipfels in der Bodenebene
Ξ	Sammlung aller Signalverarbeitungsschritte im Sonargerät
ξ	Skalierungsparameter der Gewichtungsfunktion
φ	Winkel in Polardarstellung
ϱ	Dichte
ρ_r	Fahrzeugrollwinkel
σ	Standardabweichung
$\sigma_{bs}(\theta_i)$	monostatischer Rückstreugrad, Backscattering Cross-Section
$\sigma_s(\theta_i, \theta_s)$	Streugrad, Streuquerschnitt, Scattering Cross-Section
θ	Streifwinkel, Glanzwinkel
τ	Pulsdauer
θ_i	Einfallswinkel zur Horizontalen
θ_c	Kritischer Winkel zur Horizontalen
θ_s	Streuwinkel zur Horizontalen
ϕ	Winkel zum Lot
ϕ_{bsi}	Bistatischer Einfallswinkel

ϕ_{bss}	Bistatischer Streuwinkel
ϕ_c	Kritischer Winkel zum Lot
ϕ_i	Einfallswinkel zum Lot
ϕ_s	Streuwinkel zum Lot
φ	Phasenlage
$\varphi(t)$	Phasen-/Frequenzmodulation
φ_a	Öffnungswinkel des Sonars in Azimutrichtung
φ_e	Öffnungswinkel des Sonars in Elevationsrichtung
φ_η	Zur 3 dB Strahlbreite gehöriger Winkel
φ_r	Sonarwinkel am Nadir
$\chi_{\mathcal{U}}$	Charakteristische Funktion des Kernelsupports im Kernelverfahren
Ψ	Akustische Impedanz
ψ	Strahlgewichtungsparameter der Gewichtungsfunktion
Ψ^{eff}	Effektive Impedanz
ω	Kreisfrequenz, Pulsierung
Ω	Trägerfrequenz, Carrier

Römische Zeichen

<i>a</i>	Alphabeteintrag im Kernelverfahren
<i>a</i>	Amplitude
<i>a(t)</i>	Amplitudenmodulation
<i>A</i>	Fläche
<i>a_i</i>	Frontelement im MRF-Schätzverfahren
<i>a</i>	Front im MRF-Schätzverfahren
<i>B_s</i>	Bandbreite
<i>BT</i>	Bandbreiten-Zeit-Produkt
<i>b</i>	Eingabebild
<i>B</i>	Fouriertransformierte des Eingabebilds
<i>BL</i>	Bottom loss, Verlust am Meeresboden
\bar{C}	3D-Punktwolke, bei der die Anfragelinie fehlt
<i>C</i>	Kovarianzmatrix

$\frac{ct}{2}$	Entfernungsauflösung
c	Schallgeschwindigkeit
D	Diagonalmatrix der diagonalisierten Kovarianzmatrix
d	Richtungsvariable im BeamMRF
d_f	Dispersionskoeffizient
D	Anzahl der Richtungen im BeamMRF
d_w	Wassertiefe
DT	Detection threshold, Detektionsschwelle
DI	Richtmaß, Directivity Index, Bündelungsmaß
D_B	Bhattacharyya-Distanz
D_R	Runnalls-Distanz
D_S	Salmond-Distanz
$R(x, y)$	Rückstreufaktor an der Pixelkoordinate (x, y) in der Bildebene
$E_{\text{ray}(x,y)}$	Energie eines Strahls durch das Pixel (x, y) in der Bildebene
E	Fehlermaß
e	Euler'sche Zahl
E_{max}	Gewünschter Maximalfehler der Schätzung in der Sonardomäne
f	MRF-Faktorknoten
$F(\mathbf{m})$	Summe der Intensitätswerte einer Sonarantwort
f	Frequenz
h_{AUV}	Flughöhe des AUV über Grund
$G(\theta_i, \theta_s)$	Intensitätsverteilung über den Streuwinkel, Scattering Function
h	Höhe
h_{RMS}	RMS-Rauheit
I	Akustische Intensität
\hat{I}	Geschätzte akustische Intensität
i	Imaginäre Einheit
k	Kernel
$k_{2,2}^{\text{WEND}}$	Wendland-2,2-Kernel

$k_{2,1}^{\text{WU}}$	Wu-2,1-Kernel
k_{FT}	Anteil des Flat-Top im Blackman-Harris-Fenster
K_{max}	Gewünschte Maximalzahl an Kernen
k	Wellenzahl
l_x	Länge des Sonars
l_y	Höhe des Sonars
l	Länge
$m(t,d)$	Differentielle Nachricht im MRF von der Voxelvariable (t,d) zum Faktorknoten
\mathbf{m}	Sonarmessung
\mathbf{m}_F	Sonarantwort des ebenen Meeresbodens
\mathbf{m}^{-F}	Differentielles Sonarsignal
$M_{f \rightarrow td}(o(t,d))$	Nachricht im MRF vom Faktorknoten zur Voxelvariable (t,d)
$M_{td \rightarrow f}(o(t,d))$	Nachricht im MRF von der Voxelvariable (t,d) zum Faktorknoten
\mathbf{n}_{3D}	Normalenvektor auf 3D-Punktwolke
\mathcal{N}_6	6-Nachbarschaft im Kernel-Parameterraum
NL_a	Ambient noise level, Umgebungsgeräuschpegel
NL_s	Self noise level, Eigenstörpegel
O	MRF-Belegtheitszuweisung
o	Voxelbelegung
P	Schalleistung
p	Druck
p	1D-Kernelposition in Ground Range vom Nadir
\mathbf{p}	Position in der Bodenebene
$P(\cdot)$	Wahrscheinlichkeit
p_{ref}	Referenzdruck
p_{RMS}	RMS-Druck
q	Anfragelinie für Punktwolke
Q	Mittlerer quadratischer Druck
\mathbf{p}_c	Bodenpunkt im Coiras-Verfahren

TS	Oberflächenreflektanz
r_{fern}	Abstand ab dem die Fernfelddbetrachtung gilt
r	Radius, radialer Abstand, Reichweite (Range)
\mathbf{r}	Radiusvektor
$\mathbf{r}(x,y)$	Raytracing-Strahl durch Pixel (x,y)
r_g	Horizontaldistanz, Ground Range
RL	Reverberation level, Nachhallpegel
r_s	Schrägentfernung, Slant Range
$S_{HiLight}$	Highlight-Sample in der Slant-Range-Messung
S_m	Anzahl der Sonarsamples in einer Messung, Auflösung im Sonarbereich
S	Salinität, Salzgehalt
s_{SBeg}	Beginn des Schattens in der Slant-Range-Messung
s_{SEnd}	Ende des Schattens in der Slant-Range-Messung
s	Sonarsample
$S(t_i)$	Menge der getroffenen Oberflächenelemente in einer Zeitscheibe
SL_p	Projector source level, Sendeschallpegel
T	Anzahl der Zeitschritte im BeamMRF
T	Temperatur
t	Zeit
T_{rec}	Aufnahmezeit pro gesendetem Puls
(t,d)	Voxelelement im BeamMRF
TS	Target strength, Zielmaß
TL	Transmission loss, Ausbreitungsverlust
$t^*(d)$	Zeitscheibe des ersten belegten Voxels pro Richtung im MRF-Verfahren
$\mathbf{t}^*(\mathbf{d})$	Front aus belegten Voxeln im MRF-Verfahren
U_γ	Strahlauflöser in Fahrtrichtung
u	Iterationsschritt im Kernelverfahren
\mathbf{U}	Unitäre Matrix, die die Kovarianzmatrizen diagonalisiert
x_L	Ground-Range-Koordinate in Across-Track-Richtung im lokalen Fahrzeugkoordinatensystem

v_{ph}	Phasengeschwindigkeit
V	Rayleigh-Reflexionskoeffizient
$V_c(\phi)$	Reflexionskoeffizient der gespiegelten Reflexion
\mathbf{v}	Auf die Bodenebene projizierte Blickrichtung der Sonarhauptkeule
$w(t,d)$	Differentielle Nachricht im MRF vom Faktorknoten zur Voxelvariable (t,d)
w	1D-Kernelbreite
\bar{w}	Arithmetisches Mittel zweier Gewichte
W	Transmissionskoeffizient
$w(t)$	Gewichtungsfunktion im MRF-Schätzverfahren
w^k	Gewichtungswert im Kernel-Schätzverfahren
w_{BH}	Blackman-Harris-Fensterfunktion
w_{BHFT}	Flat-Top-Blackman-Harris-Fensterfunktion
w_{beam}^k	Inverse Gewichtung nach der Antennencharakteristik im Kernelverfahren
$b_{\mathcal{U}}$	Bestrafungsfaktor im Kernelverfahren
$w_{\mathcal{U}}^k$	Durch den Kernelsupport definierte Gewichtungsfunktion im Kernelverfahren
X	Akkumulatorvariable im BeamMRF
$x(t)$	Sonarpuls
x_L	x -Koordinate im Fahrzeugkoordinatensystem
y_L	y -Koordinate im Fahrzeugkoordinatensystem
z_F	Konstantes Höhenprofil des ebenen Meeresbodens
Z	Höhenprofil einer Oberfläche
z	Höhenkoordinate

Abkürzungen

ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler, Doppler-Geschwindigkeitsmesser gegen die Wassersäule
ATR	Automated Target Recognition, Automatische Zielerkennung
AUV	Autonomous Underwater Vehicle, autonomes Unterwasserfahrzeug

BP	Belief Propagation, Inferenzalgorithmus auf Graphen
BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
CAATI	Computed Angle of Arrival Transient Imaging, Interferometrisches Auswerteverfahren
CCZ	Clarion-Clipperton Fracture Zone, Bruchzone im Pazifik
CDMA	Code Division Multiple Access, Codebasierte Aufteilung des Sendemediums
CGMRF	Compound Gauß Markov Random Field, erlaubt Unstetigkeiten
CPU	Central Processing Unit, Hauptprozessor
CW	Continuous wave, Konstantfrequenzpuls
DIDSON	Dual-frequency Identification Sonar
DPCA	Displaced Phase Center Antenna, SAS-Algorithmus mit virtuellen Phasenzentren
DSL	Deep scattering layer, streuende Wasserschicht
DT	Distance Traveled, zurückgelegte Wegstrecke
DVL	Doppler Velocity Log, doppler-basierter Geschwindigkeitssensor
EIF	Extended Information Filter, Erweitertes Informationsfilter
EKF	Extended Kalman Filter, Erweitertes Kalmanfilter
EOD	Explosive ordnance disposal, Munitionsräumung
FBR	First Bottom Return, Erstes Bodenecho
FD/FE	Finite Differenzen / Finite Elemente, Verfahren zur Näherung der Wellengleichung
FFP	Fast Field Program, Verfahren zur Näherung der Wellengleichung
NM	Normal Modes, Verfahren zur Näherung der Wellengleichung
PE	Parabolic Equations, Verfahren zur Näherung der Wellengleichung
FLS	Forward-Looking Sonar, Vorwärtsgerichtetes Sonar
FM	Frequenzmodulierter Puls
GEBCO	General Bathymetric Chart of the Ocean. Aus Einzelquellen zusammengesetzte bathymetrische Karte der Welt.

GLORIA	Geological Long Range Inclined Asdic, niederfrequentes Sidescan-Sonar
GPU	Graphics Processing Unit, Grafikprozessor
SSE2	Streaming SIMD (Single Instruction Multiple Data) Extensions 2, Vektorbefehlssatz des Prozessors
HPP	Half Power Point, Punkt bis zu dem die abgestrahlte Leistung höchstens auf die Hälfte abgesunken ist
ICM	Iterative Conditional Modes Algorithmus
ICNN	Individual Compatibility Nearest Neighbor, Datenassoziationsverfahren
ICP	Iterative-Closest-Point Algorithmus
IF-SAS	Interferometrisches synthetisches Apertursonar
IHO	International Hydrographic Organization
IMU	Inertial Measurement Unit, Inertialmesseinheit
INS	Inertial Navigation System, Inertialnavigationssystem
InSAS	Interferometrisches synthetisches Apertursonar
IS	Interferometrisches (bathymetrisches) Sidescan-Sonar
ISA	International Seabed Authority
JCBB	Joint Compatibility Branch and Bound, Datenassoziationsverfahren
JCT	Joint Compatibility Test, Datenassoziationsverfahren
JPDA	Joint Probabilistic Data Association, Datenassoziationsverfahren
LBL	Long Baseline, Akustisches Lokalisierungsverfahren
LBP	Loopy Belief Propagation, approximativer Inferenzalgorithmus auf Graphen
LFM	Linear frequenzmodulierter Puls
MBES	Multi-Beam Echo Sounder, Multibeam-Sonar, Fächerecholot
MBMA	Multi-Beam/Multi-Aspect Sidescan-Sonar
MCM	Mine countermeasures
MCMC	Markov Chain Monte Carlo
MLC	Mine-like contact
MLO	Minenartiges Objekt, Mine-Like Object

MPM	Moment-Preserving Merge, momentenerhaltende Mischverteilung
MRF	Markov Random Field
MSBS	Multi-angle Swath Bathymetry Sidescan-Sonar
MSIS	Mechanically Scanning Imaging Sonar, mechanisch rotierendes bildgebendes Sonar
MSP	Mean Square Pressure, mittlerer Quadratischer Druck
PCL	Point Cloud Library, Open-Source-Bibliothek für Punktwolken
PHD	Probability Hypothesis Density Filter
PRN	Pseudo-Random-Number (Codes), Pseudo-zufällige Zahlen (zur Kanalcodierung)
PropSfS	Propagation Shape-from-Shading, Rekonstruktionsverfahren
PSTD	Pseudo-Spectral Time Domain, Pseudo-spektraler Zeitdomänenansatz für Simulationen
RANSAC	Random Sampling Consensus, Ausreißerfilterungsverfahren
RMS	Root Mean Square, Effektivwert
ROV	Remotely Operated (Underwater) Vehicle, ferngesteuertes Unterwasserfahrzeug
RSG	Random Surface Generator, Softwarepaket von Bergström [Ber12] zur Terraingenerierung
SAR	Synthetisches Aperturradar
SAS	Synthetisches Apertursonar
SBL	Short Baseline, Akustisches Lokalisierungsverfahren
SBS	Swath Bathymetry Sidescan, Interferometrisches (bathymetrisches) Sidescan-Sonar
SfS	Shape-from-Shading-Verfahren
SIGMAS	Sonarsimulationsumgebung
SIMONA	Sonarsimulationsumgebung
SNR	Signal to Noise Ratio, Signal-zu-Rausch-Verhältnis
SOFAR	Sound Fixing And Ranging, Unterwasser-Schallkanal
SPL	Sound Pressure Level, Pegel des mittleren quadratischen Drucks
SR	Stochastic-Relaxation-Verfahren

SSBL	Super Short Baseline, Akustisches Lokalisierungsverfahren
SSS	Sidescan-Sonar, Seitensichtsonar
SVP	Sound Velocity Profile, Schallgeschwindigkeitsprofil
TDMA	Time Division Multiple Access, Zeitaufteilung des Sendemediums
TVG	Time-Varying Gain, Zeitabhängige Verstärkung des Sonarsignals im Gerät
UNCLOS	United Nations Convention on the Law of the Sea, UN-Seerechtsübereinkunft
USBL	Ultra Short Baseline, Akustisches Lokalisierungsverfahren
UXO	Unexploded ordnance, nicht detonierte Munition
XBT	Expendable Bathythermograph, Einweg-Temperatursonde

Im Gedenken an meine Eltern

1.1 Motivation und Zielsetzung

Die Weltmeere bedecken 71% der Oberfläche der Erde. Das Wissen über große Teile des Meeresbodens ist jedoch immer noch geringer als das Wissen über die Mondoberfläche, nur etwa 7% des Meeresbodens sind akustisch vermessen [Hof14]. Dies hängt mit den schwierigen Verhältnissen unter Wasser zusammen. Wasser dämpft elektromagnetische Wellen sehr stark und mit zunehmender Tiefe steigt der Wasserdruck auf Werte, denen viele Materialien nicht gewachsen sind. Die vom Menschen entwickelte Technik stützt sich außerdem vorwiegend auf elektronische Komponenten, für die die direkte Einbringung ins Wasser sofortige Funktionsunfähigkeit bedeuten. Daher ist die Erkundung der Tiefsee ein technologisch sehr anspruchsvolles Unterfangen.

Da Licht durch Wasser stark gedämpft wird und künstliche Beleuchtung eigene Schwierigkeiten mit sich bringt (siehe Abschnitt 6.1), sind schallbasierte Sensoren, sog. Sonare¹, Mittel der Wahl um im Unterwasserbereich Informationen über die Umgebung zu gewinnen.

Seitensichtsonare (engl. *side-scan sonar*; SSS) sind mit die am weitesten verbreiteten Instrumente zur Beobachtung des Meeresbodens. Da der deutsche Begriff »Seitensichtsonar« weniger geläufig ist als der englische Begriff, wird in dieser Arbeit der Begriff »Sidescan-Sonar« in eingedeutschter Schreibung verwendet. Manchmal findet sich in der Literatur für SSS auch der englische Begriff *side-looking sonar*; SLS.

Traditionell liefert ein Sidescan-Sonar einem Sonaroperator eine bildhafte Darstellung der Messwerte, aus denen der Sonaroperator Schlüsse über die Beschaffenheit des Untergrundes ziehen kann. Sidescan-Daten lassen sich durch einen menschlichen Betrachter relativ gut interpretieren, da die Bilder teilweise Ähnlichkeiten zu optischen Bildern aufweisen. Die Digitalisierung

¹ SONAR aus englisch: *SOUND Navigation And Ranging*

macht jedoch auch vor althergebrachter Sensorik nicht halt und so werden die Daten eines Sidescan-Sonars bereits länger digital übermittelt und dem Operator als Bild auf einem Bildschirm zur Verfügung gestellt. Der Operator prüft die Daten, beispielsweise um Seeminen zu erkennen oder Schiffswracks zu entdecken. Um den Operator bei derartigen Aufgaben zu unterstützen, kommt vermehrt elektronische Unterstützung in Form von Bildverbesserungen und bildbasierten Detektions- sowie Klassifikationsalgorithmen zum Einsatz. Im Zuge der fortschreitenden Autonomisierung durch autonome Unterwasserfahrzeuge (engl. *autonomous underwater vehicle, AUV*), entfällt die Möglichkeit eines menschlichen Online-Operators. Die Daten werden daher entweder erst hinterher ausgewertet, oder Online-Algorithmen müssen die Aufgabe des Operators übernehmen.

Die Zielsetzung der Arbeit besteht nun darin, durch geeignete Interpretation der Messdaten des bildhaften Sonars die dreidimensionale Gestalt des Meeresbodens zu schätzen. Diese Umgebungsrekonstruktion soll die Grundlage bilden, um beispielsweise durch Verfahren der gleichzeitigen Lokalisierung und Kartenerstellung (engl. *simultaneous localization and mapping, SLAM*) die Navigation des AUV zu stützen. Dazu ist es hilfreich, die Daten des Sidescan-Sonars nicht mehr nur als Bild zu begreifen, sondern den physikalischen Aufnahmeprozess der Daten mit einzubeziehen. Dadurch finden Effekte, die bei der Sonardatenaufnahme auftreten, und die diese Daten von optisch gewonnenen Bildern unterscheiden, eine ganz natürliche Berücksichtigung.

1.2 Eigene Beiträge

Diese Arbeit liefert folgende Beiträge zur Rekonstruktion einer Oberflächengeometrie aus bildgebenden Sonardaten eines Sidescan-Sonars:

Erweiterung eines bestehenden Rekonstruktionsverfahrens

Ein bereits auf Sonardaten arbeitendes bestehendes Verfahren von Coiras et al. [Coi07] wurde erweitert. Das bestehende Verfahren berücksichtigt zwar die physikalische Entstehung der Sonardaten, ordnet die Daten jedoch als Pixelbild an und beschränkt sich dadurch auf Datenbereiche, in denen das Aufnahmefahrzeug exakt konstant geradeaus fährt. Diese Einschränkung ist bei Sidescan-Sonardaten nicht unüblich, da durch Kurven Verzerrungen in

den Sonarbildern auftreten und es deutlich schwerer wird, auf den Bildern als Mensch etwas zu erkennen. Das Verfahren wurde nun so erweitert, dass die zugrundeliegende Datenstruktur des Verfahrens nicht mehr ein Pixelbild ist, sondern eine dreidimensionale Punktwolke. Mit dieser ist es nun möglich, die Daten entsprechend der (bekannten) Eigenbewegung des Aufnahmefahrzeugs im Raum anzuordnen. Um die im ursprünglichen Verfahren verwendeten Gradienten und Normalenvektoren verwenden zu können, werden die Entsprechungen auf der Punktwolkendarstellung berechnet.

Schaffung eines neuen Rekonstruktionsverfahrens

Ein Verfahren zur Rekonstruktion wurde gänzlich neu vor dem Hintergrund einer sich anschließenden SLAM-Formulierung entwickelt. Es zielt nicht darauf ab, die Umgebung für einen menschlichen Betrachter naturgetreu wiederzugeben, da AUVs ohnehin unbemannt sind. Das Verfahren schätzt vielmehr Umgebungselemente, die später direkt als sog. Landmarken in einem SLAM-Verfahren Verwendung finden können. Das Verfahren basiert auf der Annahme, dass sich eine Sidescan-Sonarmessung zumindest weitgehend als lineare Kombination von einzelnen Reflektanzbeiträgen voneinander entfernt liegender Objekte auf der Meeresbodenoberfläche beschreiben lässt. Unter dieser Annahme kann die Messung dann mit synthetischen, vorberechneten Messungen von Basis-Oberflächenelementen (sog. Kernel) verglichen werden. Nach einem gierigen (engl. *greedy*) Auswahlverfahren werden so lange Basiselemente gesucht, bis die Messung entweder genügend gut erklärt wird oder eine Höchstzahl von Kernen gefunden wurde. Die gefundenen Kernel der einzelnen Sonarmessungen werden entsprechend der Sonarstrahlgeometrie zu 2,5D-Objekten erweitert und gemäß der Fahrzeugeigenbewegung in eine globale Karte eingetragen. Dort werden sie mit bestehenden Kernen fusioniert, sofern sich an den Orten bereits Schätzungen befinden.

Transfer eines Verfahrens aus der optischen Domäne

Ein weiteres Verfahren, das aus dem optischen inversen Raytracing von Liu [Liu11; Liu14] stammt, wurde an die Sonaraufgabenstellung angepasst. Dort wird ein volumetrisches Rekonstruktionsverfahren auf Voxelbasis beschrieben. Um das Verfahren für die Sonardomäne anwenden zu können, musste die ursprüngliche Sichtstrahlbedingung modifiziert werden, die wie folgt lautet: Im Optischen kann man beschreiben, dass bis zum Auftreffpunkt eines Lichtstrahls auf ein Objekt kein anderes Objekt im Weg liegt (sonst

wäre dieses getroffen worden). Dann wird vom Lichtstrahl als nächstes das Objekt selbst getroffen, und im weiteren Verlauf des Sichtstrahls kann man keine Aussage mehr treffen, ob diese Bereiche zum Objekt gehören oder nicht, denn sie gehen nicht ins Messergebnis ein. Diesen Umstand macht sich Liu für eine effiziente Inferenz auf dem zugrundeliegenden MRF (engl. *Markov random field*) auf einer Voxelstruktur zunutze. Die Daten eines Sidescan-Sonars unterscheiden sich von Kamerabildern dadurch, dass eine Amplitude über der Zeit repräsentiert wird. Außerdem, darf bei der Rekonstruktion nicht nur eine einzelne Sichtstrahlrichtung betrachtet werden, da das Sonarecho zu einem bestimmten Zeitpunkt aus dem gesamten Öffnungswinkelbereich des Sonars stammen kann. Um diesen Sachverhalt beschreiben zu können wurde die MRF-Faktorgraph-Struktur durch zweidimensionale Strahlfaktoren ((engl. *beam factors*)) angepasst.

Um die wahrscheinlichste Konfiguration zu finden, die die Messdaten erklärt, wird (wie im Originalverfahren) *loopy belief propagation* verwendet. Das ist ein Verfahren, das diese Konfiguration durch Austauschen von Nachrichten im MRF findet². Der Nachrichtenaustausch zwischen den Elementen des MRF musste auf das schwierigere Problem der zweidimensionalen Strahlfaktoren angepasst werden. Außerdem wird eine approximative Lösung auf Basis von raumfüllenden Hilbertkurven vorgeschlagen, das den Rechenaufwand weiter senkt.

Schaffung eines Simulators für Sidescan-Daten

Für eine Evaluation der entwickelten Verfahren sind im Idealfall Original-Sidescan-Sonardaten mit annotierten Grundwahrheiten einzusetzen. Solche Daten waren trotz mehrfacher Bemühungen nicht zu bekommen. Daher wurde die Simulationsumgebung »WOSIM« für Sidescan-Sonardaten entwickelt, um Experimente mit vollständiger Grundwahrheit durchführen zu können. Diese Simulationsumgebung beinhaltet Generatormodule für unterschiedliche Bodengeometrien, die möglichst naturnah sind. Der Simulator beinhaltet eine neue Frequenzverteilung zur Erstellung von Sandwellenterains. Die physikalischen Aufnahmeeigenschaften eines Sidescan-Sonars wurden möglichst gut wiedergegeben: Die Simulation unterstützt beliebige dreidimensionale Antennencharakteristiken und verschiedene Methoden

² Die Konfiguration wird nicht garantiert für alle MRF-Strukturen gefunden, siehe Abschnitt 9.4.4

der Sonarsignalerzeugung: Eine inkohärente Beschallung, die Verwendung von Konstantfrequenzpulsen und frequenzmodulierte Pulse (sog. Chirps). Besonders hervorzuheben an der Simulation ist, dass durch die Einbettung eines optischen Raytracers die Simulation für beliebige 3D-Geometrien prinzipiell möglich ist und man nicht auf 2,5D-Höhenkarten beschränkt ist.

1.3 Gliederung

Die Arbeit gliedert sich wie folgt: In Kapitel 2 wird der Meeresboden als Interessengebiet motiviert. Danach werden die Grundlagen zur Ausbreitung von Schallwellen unter Wasser und deren Rückstreuung an Grenzflächen erläutert (Kapitel 3 und 4). Mögliche Störeinflüsse auf das Sonarsignal werden in Kapitel 5 beschrieben. Daran schließt sich in Kapitel 6 eine Übersicht über existierende Sonarsensorik und deren Messprinzipien an. Der Schwerpunkt liegt auf der Erklärung des Aufnahmevorgangs des Sidescan-Sonars. In Kapitel 7 wird umfassend über den Stand der Forschung in Sonardatenauswertung, Rekonstruktion und Unterwasser-Kartenerstellung berichtet. Dabei finden auch Arbeiten Erwähnung, die Daten anderer Sonarsensoren verwenden oder Sonardaten mit weiteren, nicht-akustischen Sensormodalitäten kombinieren.

Den Hauptteil der Arbeit bilden Kapitel 8 und 9. Dort werden die vom Autor entwickelten Verfahren zur Simulation und Rekonstruktion ausführlich vorgestellt. Daran schließt sich in Kapitel 10 die Bewertung der Verfahren an. Das Schlusskapitel (Kapitel 11) gibt eine Zusammenfassung und zeigt mögliche Weiterentwicklungen der entwickelten Verfahren.

Da für viele Begriffe der englische Ausdruck gängiger ist als das deutsche Äquivalent, ist an den entsprechenden Stellen die englische Bezeichnung in Klammern mit angegeben. Wird der englische Begriff im Deutschen verwendet, wird eine eingedeutschte Schreibung angewendet.

Die Weltmeere als Interessengebiet

2.1 Rohstoffe

Durch zunehmende Ausbeutung von Landlagerstätten wichtiger Metallerze und Erdöl geraten Lagerstätten am Meeresboden immer mehr ins Visier der Bergbauindustrie. Zukünftig soll der Unterwasserbergbau (UW-Bergbau) stärker dazu dienen, den Bedarf der Menschheit an Metallen zu decken. Die nächsten Abschnitte widmen sich den unterschiedlichen Rohstoffen im Unterwasserbereich.

2.1.1 Unterwasser-Bergbau

Die abnehmende Qualität der an Land verfügbaren Erze und die dort zunehmend nötige Beiseiteschaffung von wirtschaftlich uninteressanten Deckschichten machen unterseeische Lagerstätten zusehends attraktiv [Bak13]. Erze an Land enthalten inzwischen teilweise sogar niedrigere Metallanteile (z. B. Kupfer: 0,6% an Land, 0,96% in unterseeischen Manganknollen) als die unterseeischen Erze. Außerdem werden die Abraummengen³ beim Abbau an Land immer höher, während die Erze am Meeresboden direkt zugänglich sind [Hal14]. Zudem bergen Landlagerstätten erhebliche Belastungen für die Umwelt, z. B. liegen erschließbare Landlagerstätten für Nickelerze zunehmend unter tropischen Urwäldern, die zur Gewinnung abgeholzt werden müssen. Die Lagerstätten am Meeresboden für z. B. Kobalt, Nickel, Mangan und Molybdän sind umfangreicher als die Vorkommen an Land [Cla13c]. Insbesondere die Kobaltmenge in Unterwasserlagerstätten ist mehr als zwanzigfach so hoch wie an Land, die Nickelmenge immerhin fast drei mal so hoch [Hal14].

³ Abraum bezeichnet Deckschichten, die beiseite geschafft werden müssen, um die Erze zu erreichen.

2.1.2 Manganknollen

Manganknollen (engl. *manganese nodules*, *polymetallic nodules*) sind golfballgroße bis kartoffelgroße Mineralansammlungen von Mangan- und Eisenoxiden [Cla13c]. Sie bilden sich in Wassertiefen von ca. 4000 – 6500 m und entstehen durch Ausfällung aus umgebendem Meerwasser (hydrogenetisch) oder aus Porenwasser (diagenetisch) des Sediments [Cla13c]. Als Keim dient ein kleines Objekt (z. B. ein Haifischzahn) um das herum sich die Oxide schichtweise ablagern.

Das Wachstum von Manganknollen ist bei beiden Prozessen mit ein bis zehn Millimetern (hydrogenetisch) bzw. einigen hundert Millimetern (diagenetisch) pro 1 Million Jahre (Ma) äußerst langsam. Meist sind beide Prozesse beteiligt und das durchschnittliche Wachstum liegt bei einigen Zentimetern pro 1 Ma [Cla13c].

Manganknollen bestehen neben dem namensgebenden Mangan auch zu größeren Anteilen aus Eisenverbindungen. In deutlich geringeren, aber dennoch wirtschaftlich interessanten Mengen (je nach Meeresgebiet jeweils ca. 1 Masseprozent) sind Nickel, Kupfer und Kobalt enthalten [Fle12]. Weitere Bestandteile sind Seltene Erden (engl. *rare earth elements*, *REE*) und Metalle der Platingruppe [Fle12]. Interessante weitere Bestandteile sind bei Knollen und Krusten (siehe Abschnitt 2.1.4): Molybdän, Vanadium, Niob, Tellur, Wolfram und Gallium [Hal14].

Vorwiegend sind Manganknollen im Pazifik zu finden [Int03]. Die ökonomisch am vielversprechendsten Vorkommen liegen in der *Clarion-Clipperton Fracture Zone (CCZ)* im Pazifik zwischen Hawaii und Mexiko in der viele Staaten Lizenzgebiete zum Abbau haben (u. a. auch Deutschland).

Noch ist unklar, wie eine starke Sedimentaufwirbelung beim Abbau der Manganknollen vermieden werden kann, da die Knollen auf nur ganz leicht verdichtetem Sediment liegen [Boe10]. Da noch nicht abzusehen ist, wie sich eine massive Sedimentaufwirbelung auf das Leben in der Tiefsee auswirkt, wird versucht, möglichst behutsam vorzugehen. Beispielsweise waren 2004 nach über 25 Jahren die Spuren des 1978 erfolgten Experimentalabbaus in der CCZ (Abschabung der oberen 4,5 cm auf einer 1,5 m breiten Bahn) immer noch klar sichtbar [Cla13c]. Dies zeigt, dass Prozesse in der Tiefsee sehr langsam ablaufen und dementsprechend ist große Vorsicht beim Abbau geboten.

2.1.3 Massivsulfide

Massivsulfide (engl. *seafloor massive sulphides, SMS*) entstehen in der Nähe von Hydrothermalquellen, die ihrer Erscheinung nach oft auch »schwarze Raucher« genannt werden. Diese finden sich meist an tektonischen Plattengrenzen in Tiefen von 500 – 5000 m. Dort strömt Meerwasser entlang von Kanälen durch vulkanisches Gestein und erhitzt sich auf Temperaturen von über 400 °C. Dabei lösen sich Metalle und Schwefel aus dem Gestein. Sobald diese heiße Lösung wieder austritt und mit kaltem Meerwasser in Kontakt kommt, fallen die gelösten Stoffe aus und lagern sich in der Umgebung der Hydrothermalquelle ab [Pet12].

Neben Schwefel und Eisen, die den größten Masseanteil haben, finden sich auch Kupfer, Zink, Silber und Gold sowie Seltene Erden in den Massivsulfiden. Weitere wirtschaftlich interessante Bestandteile bei SMS sind Antimon, Bismut, Indium, Germanium und Selen [Hal14].

Auch hier dauert es sehr lange (größenordnungsmäßig Tausende von Jahren) bis Vorkommen in ökonomisch nutzbarer Größe entstanden sind.

Für die Gewinnung kommt erschwerend hinzu, dass der Abbau nur an erloschenen Hydrothermalquellen stattfinden sollte, um die einzigartige biologische Artenvielfalt an aktiven Hydrothermalquellen nicht zu gefährden. Die Massivsulfid-Vorkommen am Meeresboden sind darüber hinaus auch nicht reichhaltig genug um Landbergbau zu ersetzen, sondern die Vorkommen können allenfalls einen Beitrag zur Versorgungssicherheit leisten [Cla13a].

2.1.4 Kobaltkrusten

Kobaltkrusten, auch kobalthaltige Eisen-Mangankrusten (engl. *cobalt(-rich) crusts*) genannt, bilden sich laut Hein et al. [Hei02a] meist an unterseeischen Gebirgsketten zwischen 400–4000 m. In Tiefen von ca. 800 – 2500 m sind die Vorkommen am dicksten und häufigsten. Die Krusten bestehen hauptsächlich aus Eisen- und Manganoxiden. Der namensgebende Kobaltgehalt beträgt meist 0,5%–0,8% kann aber auch bis zu etwa 2% betragen. Der Nickelgehalt liegt bei bis zu 1,1% und der Platingehalt bei bis zu 1,3 Millionstel [Cla13b]. Aufgrund des Booms der Photovoltaik ist der vergleichsweise sehr hohe Tellurgehalt von 6–52 Millionstel wirtschaftlich wichtig [Hei03b]. Der Anteil an Seltenerdenmetallen liegt üblicherweise bei 0,1%–0,3 Gewichtsprozent [Leh14].

Die mittlere Krustendicke beträgt zwischen 5 und 40 Millimetern, wobei Krusten über 80 Millimetern selten sind [Hei02a]. Es gibt vereinzelt aber Krusten, die bis zu 25 cm dick sind [Fle12]. Das hydrogenetische Wachstum ist mit bis zu 11 mm/Ma ähnlich langsam wie bei Manganknollen, liegt aber meistens bei 1–6 mm/Ma [Hei02a]. Durch diagenetische Prozesse phosphatieren die ältesten (bodennächsten) Schichten der Kruste, wodurch sich die Zusammensetzung der Krusten mit dem Alter ändert: U. a. Eisen, Aluminium, Titan, Kobalt und Mangan gehen verloren, jedoch reichern sich u. a. Nickel, Kupfer, Zink, Seltenerdenmetalle und Platin bei älteren Krusten an [Hei02a].

Der Abbau der Kobaltkrusten wird aufgrund der durchaus festen Verbindung mit dem Untergrund als technisch noch aufwändiger betrachtet als etwa von Manganknollen oder Massivsulfiden [Cla13b]. Die Unterscheidung von normalem Sediment kann unter anderem dadurch erfolgen, dass Kobaltkrusten das drei- bis fünffache an Gammastrahlung aussenden wie Basalt oder Sedimentgestein [Hei02a].

2.1.5 Gashydrate

Gashydrat (engl. *gas hydrates*) ist eine Verbindung aus verschiedenen Gasen und Wasser, wobei das Methanhydrat (die Verbindung von Methan mit Wasser) aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten am interessantesten ist. Genau genommen handelt es sich um ein Clathrat, eine Einschlussverbindung, bei der Gast-Moleküle in einem Wirt-Kristallgitter eingeschlossen sind, ohne dass eine chemische Bindung besteht [Bea14b]. Gashydrate sind als unerwünschtes Nebenprodukt bei der Gasförderung schon länger bekannt, da es durch die Hydratbildung zur Blockade von Gasleitungen kommen kann. Der gezielte Abbau in der Natur ist hingegen eine vergleichsweise neue Entwicklung.

Die Hydrate sehen ähnlich aus wie Wassereis und entstehen durch Methan, das aus dem Zersetzungsprozess sedimentierten organischen Materials stammt. Methanhydrat ist bei Drücken über 35 bar und niedrigen Temperaturen stabil. Daher finden sich Gashydrate meist an den Abhängen der Kontinentalschelfe in Tiefen von etwa 350 – 5000 m und sehr viel seltener in den küstenfernen Gebieten, da es im offenen Ozean eher wenige organische Nährstoffe gibt, die für die Methanentstehung notwendig sind. Die Hydrate kommen meist vergesellschaftet mit dem Sediment vor, da sich das Hydrat in den Poren des Sediments bildet. Die Hydrat-Stabilitätszone, in der die Hydrat-

Reservoire liegen, kann sich – je nach geothermaler Erwärmung – auch noch einige hundert Meter tief in den Meeresboden erstrecken [Bea14b].

Die Speicherung von Methan in Hydrat ist sehr effektiv: Ein Liter Methanhydrat besteht zu 0,8 Litern Wasser und 164–172 Litern Methan (bei Normdruck) [Bea14b].

Zur Förderung von Methan aus Hydrat wurden bisher folgende Konzepte vorgeschlagen, die alle darauf basieren, das Gas an Ort und Stelle aus dem Hydrat auszutreiben. Das Dekompressionsverfahren verringert den Druck am Hydrat und begünstigt damit die Zersetzung. Eine weitere Methode erwärmt das Hydrat wodurch es sich zersetzt. Ein anderes Vorgehen stimuliert durch Alkohole und Salze die Zersetzung [Bea14a]. Es kann aber auch durch Kohlendioxid aus dem Hydrat verdrängt werden [Leh14].

Der Abbau von Methanhydrat mittels Dekompressionstechnik wurde 2013 im Nankai-Graben⁴ erprobt und innerhalb von 6 Tagen konnten 120.000 Kubikmeter Gas gewonnen werden bis das Bohrloch mit Sand zugesetzt war [Bea14a].

2.1.6 Erdöl und Erdgas

Zur Erkundung von Öl- und Gasfeldern wird vorrangig Sonartechnologie verwendet, die es vermag tief ins Sediment einzudringen (siehe Abschnitt 6.3.12). Die Vermessung von Öl- und Gaslagerstätten mit Sonartechnik ist gängige Praxis. Die Inspektion der UW-Fördereinrichtungen ist jedoch noch nicht abschließend gelöst (Abschnitt 2.2.2).

2.2 Inspektionsaufgaben

Nicht nur die Erschließung von unterseeischen Lagerstätten ist ein drängendes Problem, sondern auch der Bau und die Instandhaltung von Unterwasser-Infrastruktur. Bereits jetzt werden Unterseepipelines und Unterseekabel auf Schäden geprüft, aber gerade im Zuge des Unterwasserbergbaus wird Infrastruktur zukünftig in deutlich größerem Umfang gewartet werden müssen. Je mehr Infrastruktur am Meeresboden errichtet wird, desto wichtiger wird die Instandhaltung derselbigen. Auch im Flachwasser werden

⁴ Der Nankai-Graben liegt in der Nähe von Japans Pazifikküste.

Inspektionen vermehrt automatisiert durchgeführt, etwa die Inspektion von Hafenanlagen, die durch Korrosion oder Schiffsberührungen in Mitleiden-schaft gezogen werden [Jac15].

2.2.1 Kabel

Unterwasserkabel und Pipelines müssen in regelmäßigen Abständen über-prüft werden, um Fehlerfreiheit zu gewährleisten und Schwachstellen früh-zeitig aufzudecken. Es findet derzeit lediglich eine Lageinspektion statt, jedoch keine Funktionsinspektion, die eine Beschädigung konkret erkennt. Carter et al. [Car09] nennt jedes Jahr 100–150 Meldungen von Kabelbeschädi-gungen, wobei Kabel vorwiegend nicht durch natürliche Ursachen beschädigt werden (weniger als 10%), sondern hauptsächlich (59%) durch Schlepp-netzfischerei und Ankern von Schiffen. Und das obwohl die Regularien eigentlich vorsehen, dass Anker oder Fischereiausrüstung zurückgelassen werden müssen, falls durch Verhaken Beschädigungen an Kabeln drohen.

Um das Ausmaß der Beschädigung festzustellen ist eine Inspektion des Schadens nötig, die derzeit entweder mit Tauchern oder mit ferngesteuerten Unterwasserfahrzeugen (engl. *remotely operated vehicle, ROV*) durchgeführt wird. Auch ohne dass eine Beschädigung vorliegt, wird regelmäßig die Eingrabungstiefe (engl. *burial depth*) kontrolliert.

Unterhalb des Bereichs, in dem Tiefseefischerei stattfindet (je nach Gebiet ca. 1500 Meter), werden Kabel nicht mehr eingegraben, sondern einfach auf dem Grund verlegt. Um zu vermeiden, dass Kabel an kritischen Stellen durch weggespültes Sediment durchhängen und infolgedessen reißen, werden die Kabel dort besonders locker verlegt und ggf. eine extra Schlaufe gelegt.

2.2.2 Öl- und Gasförderung

Die Umweltauflagen für die Öl- und Gasindustrie sind in Borthwick et al. [Bor97] detailliert aufgeführt, jedoch ist spätestens seit dem Deepwater-Horizon-Unfall in 1500m Tiefe im April 2010 allen Beteiligten klar, dass zukünftig noch mehr Inspektion von Unterwasser- und speziell Tiefsee-Förderanlagen notwendig ist. Passiert ist seit dem Unfall allerdings noch ver-gleichsweise wenig: Es gab zwar seither Verbesserungen beim Umweltschutz und strengere Regeln für die Bohrlochgestaltung [Mad15; Tra10] und auch die Regularien für die Reaktionen auf einen Ölunfall werden derzeit verschärft,

allerdings sieht die zuständige Kommission noch großen Bedarf, Regelungen zu verabschieden, die die Ressourcen für Instandsetzungsprogramme nachhaltig sichern [Gra13]. Derzeit sind im Golf von Mexiko mehr Bohranlagen aktiv als vor dem Deepwater-Horizon-Unfall [Gra14]. Die Regularien für Pipelines lauten derart, dass der Betreiber sie in gutem Zustand halten muss (engl. *fitness for purpose assessment*) was Inspektion, Wartung und Reparaturen beinhaltet [Cli05]. Diese werden durch Unterwasserfahrzeuge in regelmäßigen Abständen durch Sonare und Kameras kontrolliert (etwa in Jacobi et al. [Jac14]) und dabei drohende Gefahren wie z.B. Unterspülung der Pipeline erkannt.

2.3 Militärische Interessen

Für verteidigungstechnische Fragestellungen ist insbesondere die automatische Zielerkennung (engl. *automated target recognition, ATR*) wichtig. Beispielsweise wird bei Missionen zur Minenräumung (engl. *mine countermeasures, MCM*) durch Sonarbildauswertung eine Vorauswahl an Objekten getroffen, die Unterwasserminen darstellen können (engl. *mine-like contact, MLC*), um den menschlichen Operator zu unterstützen. Man möchte aus Sicherheits- und Kostengründen bemannte Spezialschiffe durch unbemannte Systeme ersetzen und benötigt dafür leistungsfähige Unterwasserbildgebung und präzise Unterwassernavigation. Erschwerend kommt hinzu, dass Minen vergleichsweise selten am Meeresboden auftauchen, Erkennungssysteme diese jedoch mit hoher Wahrscheinlichkeit erkennen sollen, dabei aber nur eine Falschalarmrate in der Groenordnung von höchstens 10^{-8} (bei On-Board-Systemen) haben sollen [Pet14].

Allerdings ist diese Fragestellung nicht nur im militärischen Kontext wichtig, auch die Sicherung ziviler Handelsrouten gegen Minen ist von großem Interesse, da etwa 90% des Welthandels über das Meer abgewickelt wird [Pet14].

2.4 Bau von Unterwasseranlagen

Bereits *vor* dem Bau von UW-Infrastruktur muss sichergestellt werden, dass das Gebiet sich für die Bebauung eignet: Diese Voruntersuchungen

sind besonders beim Bau von Windenergieanlagen in Nord- und Ostsee von großer Wichtigkeit, denn dort liegen immer noch große Mengen an Weltkriegsmunition, die eine erhebliche Gefahr beim Bau und Betrieb von Offshore-Anlagen bedeuten.

Falls Munition gefunden wird, muss sie von Räumunternehmen aufwendig entsorgt werden, bevor der Bau beginnen kann. In diesem Zusammenhang spricht man im Englischen von *unexploded ordnance (UXO) detection* bzw. von *explosive ordnance disposal (EOD)*. Die mit Munition belasteten Bereiche innerhalb der 12-Meilen-Zone sind in Abbildung 2.1 abgebildet. Die Daten stammen aus [Boe11].

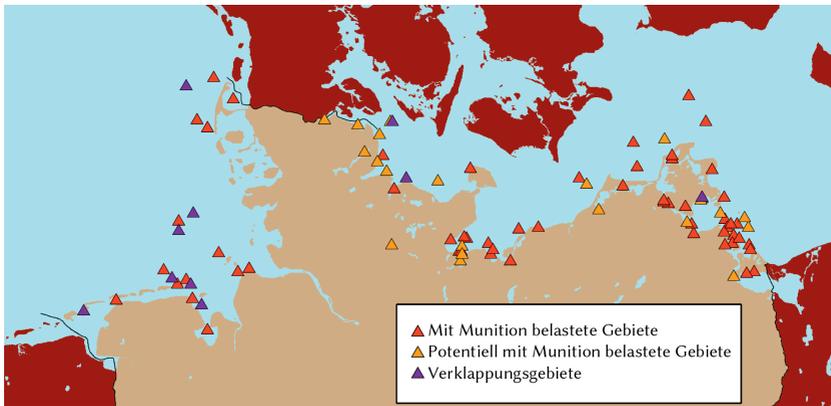


Abbildung 2.1: Mit Munition belastete Gebiete innerhalb der 12-Meilen-Zone in deutschen Gewässern. Grafik mit freundlicher Genehmigung von David Rose.

2.5 Maritime Souveränität

Die Erkundung der Unterwassergebiete liegt auch im ureigenen Interesse eines jeden Küstenstaats, sei es zur Grenzsicherung oder zur Nutzung der marinen Ressourcen in der ausschließlichen Wirtschaftszone (200-Meilen-Zone). In der UN-Seerechtsübereinkunft (engl. *United Nations Convention on the Law of the Sea, UNCLOS*) von 1982 wurden Regelungen getroffen, die die Souveränität der Staaten im maritimen Bereich klären. Diese seerechtlichen Zonen sind in Abbildung 2.2 dargestellt. Nicht alle Staaten haben das UNCLOS-Abkommen unterzeichnet, prominentester Nicht-Unterzeichner

dürften die Vereinigten Staaten von Amerika sein. Zusammenfassend kann man sagen, dass bis zum Ende der Anschlusszone ein Staat die Hoheit über Luftraum, Wasser und Meeresboden besitzt, und innerhalb der ausschließlichen Wirtschaftszone die Hoheit über Wasser und Meeresboden besitzt. Bis zu den Grenzen der Kontinentalschelfe eines Staates darf der Staat die Ressourcen auf dem Meeresboden und darunter exklusiv nutzen, auch wenn sie über die 200-Meilen-Zone hinausragen. Dann muss dafür jedoch bis zu 7% des dort erwirtschafteten Werts an die International Seabed Authority (ISA) bezahlt werden [Bak13]. Diese Regelung dürfte der Grund sein, warum die Festlegung der Kontinentalschelfe z. B. in der Arktis so heftig diskutiert wird. Die umstrittenen Gebiete der Beantragungen umfassen etwa ein Gebiet so groß wie der Nordamerikanische Kontinent [Fab11]. Laut Jackson et al. [Jac07] umfasst der Bereich von den Küsten bis zum Rand der Kontinentalschelfe (engl. *shelf-slope break*) in Wassertiefen von ca. 100–130 m ca. 8% der gesamten Weltmeere. Die genauen Festlegungen sind weiterhin im Gange, einen guten und aktuellen Überblick über die Aktivitäten dazu gibt [Thy15].

2.6 Fischerei

In der Fischerei sind Sonare im Einsatz um Fischschwärme orten zu können [Ros14]. Der Grund für die gute Sichtbarkeit von Fischen in Sonaraufnahmen liegt hauptsächlich an der Schwimmblase (falls vorhanden), da hier der akustische Impedanzunterschied am größten ist und sehr hohe Impedanzunterschiede bei hohen Frequenzen als geometrischer Reflektor agieren (siehe Abschnitt 4.2.1). Der Unterschied zwischen Fischen mit und ohne Schwimmblase kann 10–15 dB erreichen [Lur10]. Aktuelle Verfahren setzen DIDSON-Sonare (siehe Abschnitt 6.3.6) zur Fischzählung ein [Mar15].

Zunehmend wird auch die Infrastruktur von Aquakulturen mittels Sonaren überwacht. Beispielsweise wachsen die Netze der Aquakulturen mit Korallenmoosen zu (engl. *biofouling*), was den Wasseraustausch behindert [Kas12].

2.7 Biologische Forschung

Ebenfalls großes Interesse an der Erfassung der Unterwasserwelt durch Sonare besteht seitens der biologischen Forschung. Noch ist man beschäftigt, die Flora und Fauna im Meer zu katalogisieren und zu vermessen. Von

2000–2010 lief dafür ein groß angelegtes Projekt namens *Census of Marine Life*, das unerwartete Ergebnisse bezüglich der Anzahl der Lebewesen und der Artenvielfalt gebracht hat⁵. Aufgrund des großen Erfolges wurde das Nachfolgeprojekt *Life in a changing ocean*⁶ gestartet. Durch diese Forschung sollen Änderungen z. B. durch den Klimawandel frühzeitig erkannt werden.

Außerdem hofft man bei Lebewesen, die sich an so extreme Lebensräume angepasst haben, auf nützliche Entdeckungen für die Wirtschaft.

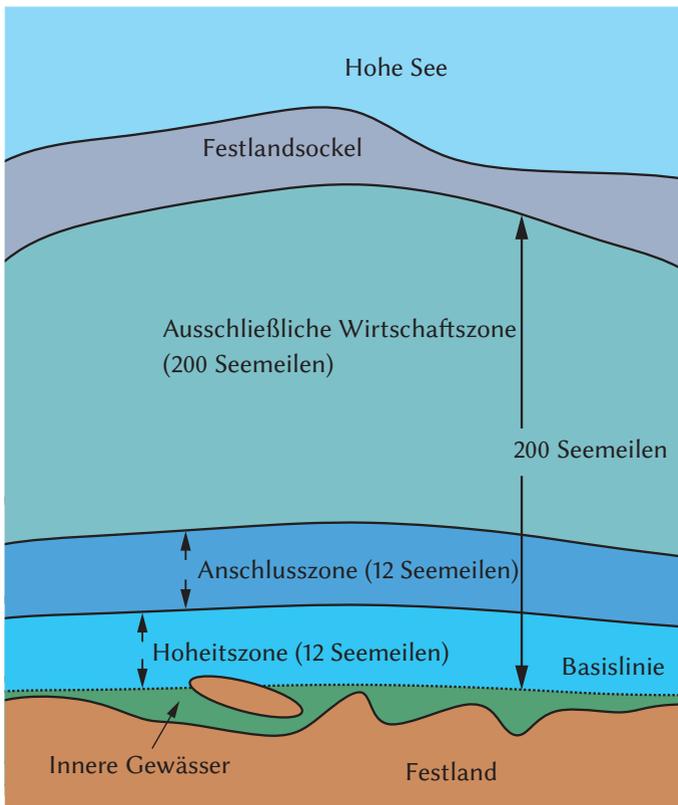


Abbildung 2.2: Maritime Zonen nach der UNCLOS von 1982.

⁵ <http://www.coml.org> abgerufen am 01.10.2015

⁶ <http://lifeinachangingocean.org> abgerufen am 01.10.2015

2.8 Existierendes Kartenmaterial

Die bisher über den Meeresboden bestehenden Karten speisen sich aus unterschiedlichen Datenquellen: Die ältesten Informationen zu Wassertiefen finden sich entlang von Schiffshandelsrouten [Bec08] durch Multibeamsonare und Echolote. Mithilfe von Schwerefeldmessungen von Satelliten wie GOCE (*Gravity field and steady-state ocean circulation explorer*) und GRACE (*Gravity Recovery And Climate Experiment*) konnten globale Karten des Meeresbodens erstellt werden, allerdings mit vergleichsweise grober Auflösung (ungefähr Strukturen von 10km^2 Größe) [Hof14]. Abseits von Handelsrouten sind einzelne Bereiche durch Forschungsschiffe oder die Öl- und Gasindustrie erkundet, ansonsten besteht noch großer Bedarf an flächendeckender, hochaufgelöster Kartierung.

Es gibt Bestrebungen, die weit verteilten Datenbestände zu bündeln, z. B. hat das BSH (Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie) eine deutschlandweite Datenbank namens GeoSeaPortal⁷ ins Leben gerufen, in der die vom BSH erhobenen maritimen Daten einheitlich zugänglich gemacht werden sollen. Auf europäischer Ebene hat INSPIRE⁸ eine ähnliche Aufgabe (nicht beschränkt auf maritime Daten). Eine aus unterschiedlichen Datenquellen zusammengesetzte topografische Karte der Welt auf Basis der GEBCO08-Daten [GEB08] ist in Abbildung 2.3 gezeigt. Die Auflösung beträgt eine Bogenminute Auflösung, was am Äquator etwa einem Höhenwert alle 1853 m entspricht. Seit 2014 gibt es einen aktualisierten Datensatz GEBCO14 mit 30 Bogensekunden Auflösung [GEB14].

Allgemein gesehen ist der Meeresboden eher flach, selbst in der Nähe von Unterwasserbergen, Meeresrücken und den Kontinentalschelfhängen beträgt die Steigung selten mehr als 10° [Jen11].

2.9 Bezeichnungen und Meerestiefen

Beim Studium der Fachliteratur stößt man häufig auf Termini, die im maritimen Umfeld oft gebraucht werden und hier kurz vorgestellt werden sollen (aus [Lal97]): Von der Küste aus gesehen spricht man bis zu dem Abstand,

⁷ <https://www.geoseaportal.de/gdi-bsh-portal/ui> abgerufen am 10.08.2015

⁸ <http://inspire.ec.europa.eu> abgerufen am 01.10.2015

an dem die Wassertiefe 200 m überschreitet (also in etwa bis zum Rand des Kontinentalschelfs), von der neritischen Zone, weiter entfernt ist dann die ozeanische Zone bzw. das offene Meer.

Das Pelagial bezeichnet den Bereich innerhalb der Wassersäule, der Bereich des Meeresbodens wird auch als Benthos bezeichnet. Flora und Fauna am Meeresboden werden Benthos genannt. Die in der Arbeit vorgestellten Verfahren wurden für die Bedingungen im Bathypelagial (1000–4000 m) und im Abyssopelagial (4000–6000 m) entwickelt.

Der Begriff der Tiefsee wird unterschiedlich gehandhabt und ist daher weniger scharf definiert. Der Konsens scheint darin zu bestehen, dass Tiefsee denjenigen Bereich kennzeichnet, in dem kaum mehr Temperatur- und Salzgehaltsschwankungen auftreten und kein Sonnenlicht mehr sichtbar⁹ ist. Diese Definition wird im Folgenden auch verwendet.

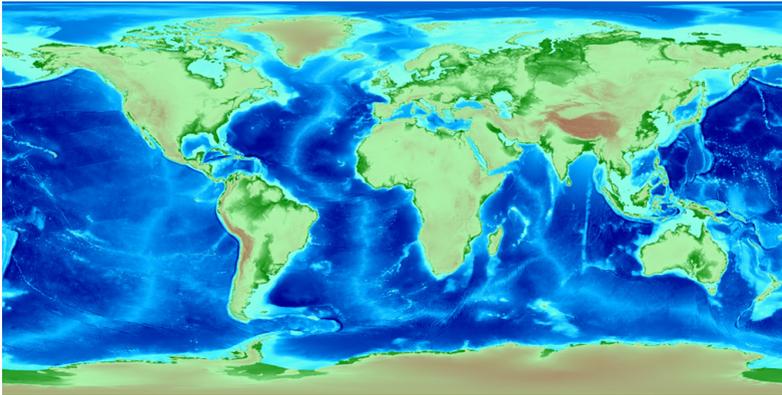


Abbildung 2.3: Höhenkarte der Welt, erzeugt aus den Daten des GEBCO08 Datensatzes. Die Farbgebung soll insbesondere die Struktur der Tiefsee hervorheben.

⁹ Sonnenlicht klingt mit der Wassertiefe exponentiell ab (siehe Abschnitt 6.1.1). Selbst wenn noch einzelne Photonen ankommen sollten, spricht man in der Tiefsee von absoluter Dunkelheit.

Schallausbreitung unter Wasser

3.1 Einführung

Die Betrachtung, wie sich Schall unter Wasser ausbreitet, ist für die Aufgabestellung der Arbeit essentiell, aber auch in anderen Bereichen unverzichtbar: Angefangen bei vielfältigen militärischen Fragestellungen und der Fischerei ist das Verständnis für die Schallausbreitung wichtig für Simulationsaufgaben bezüglich Unterwasser-Netzwerktechnik [Bur11] und zugehöriger Protokollentwicklung, Sonarsensorentwicklung und nicht zuletzt zur Erlangung tieferen Verständnisses biologischer Sachverhalte (z. B. Kommunikation der Meeressäuger).

In dieser Arbeit sollen die physikalischen Grundlagen auf die Elemente beschränkt werden, die für die Umfelderfassung eines Tiefseefahrzeugs wichtig sind. Dem interessierten Leser seien hier weitere Einstiegspunkte in das komplette Feld der Unterwasserakustik an die Hand gegeben: Details über die Aufbau und Funktionsweise von Unterwasser-Schallwandlern findet man bei Sherman [She07]. Relativ ausführlich wird die Sonardatenaufnahme bei Stergios [Ste01] behandelt. Einen umfassenden Gesamtüberblick über die Unterwasserakustik gibt das Standardwerk von Lurton [Lur10]. Schwerpunktmäßig mit der Auswertung von Sidescan-Sonardaten beschäftigt sich Blondel [Blo09]. Weiterführende Literatur, die den gesamten Themenkomplex der Unterwasserakustik beleuchtet, sind die Bücher von Hodges [Hod10], Etter [Ett13] und Urban [Urb02]. Einen starken Fokus auf die mathematischen Modelle der Schallausbreitung legen Jensen et al. in [Jen11]. Der Datenaufnahme mit hochfrequenten Sonarsystemen widmet sich Jackson [Jac07], wobei insbesondere das Rückstreuverhalten im Zusammenhang mit den geoakustischen Eigenschaften des Meeresbodens behandelt wird. Allgemeine Informationen zu akustischen Fragestellungen sind bei Lerch [Ler09], Kutter [Kut06], Rossing [Ros14] oder Müller [Mül04] zu finden.

Die mathematischen Gleichungen, auf die in den Kapitel 3 bis 5 zurückgegriffen wird, stammen zu einem großen Teil aus den o. g. Büchern.

3.2 Schallgeschwindigkeit

Es gibt in der Literatur viele Formeln für eine Näherung der Schallgeschwindigkeit c in Meerwasser abhängig von Wassertiefe d_w , Temperatur T und Salzgehalt S . Grundsätzlich gilt, dass im betrachteten Bereich wärmeres Wasser den Schall schneller leitet als kaltes und dass die Schallgeschwindigkeit mit der Wassertiefe aufgrund des hydrostatischen Drucks linear zunimmt [Lur10].

Eine gängige Formel für die Schallgeschwindigkeit in m/s , stammt von Mackenzie [Mac81]. In die Berechnung geht die Wassertiefe in Metern ein, die Temperatur in $^\circ\text{C}$ und die Salinität in ‰ . Der Definitionsbereich der Formel deckt folgende Bereiche ab: 0–8000 m Wassertiefe, -2 bis 30°C Wassertemperatur und 25–40 ‰ Salzgehalt. Die Formel kommt 9 Termen aus und lautet [Ett13]:

$$\begin{aligned}
 c := & 1448,96 + 4,591T - 5,304 \cdot 10^{-2}T^2 + 2,374 \cdot 10^{-4}T^{-3} \\
 & + 1,340(S - 35) + 1,630 \cdot 10^{-2}d_w + 1,675 \cdot 10^{-7}d_w^2 \\
 & - 1,025 \cdot 10^{-2}T(S - 35) - 7,139 \cdot 10^{-13}Td_w^3.
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Sie approximiert die detailliertere 19-Term-Gleichung von Del Grosso und Mader [Gro72], welche ihrerseits Schallgeschwindigkeitsmessungen (die mit einer Messunsicherheit von $0,015 \text{ m/s}$ behaftet sind) mit einer Standardabweichung von $0,003 \text{ m/s}$ annähert. Im Definitionsbereich hat die Formel von Mackenzie einen Standardfehler von nur $0,07 \text{ m/s}$ zur Gleichung von Del Grosso und Mader.

Neuere Approximationsformeln haben einen noch größeren Gültigkeitsbereich, besitzen dadurch aber auch mehr Terme. Die Formel 3.1 ist in den Abbildungen 3.1 und 3.2 für 3,5 ‰ Salzgehalt aufgetragen, was dem durchschnittlichen Salzgehalt der Weltmeere entspricht.

3.2.1 Schallgeschwindigkeitsprofil

Als Näherung für das vollständige Schallgeschwindigkeitsfeld über dem Ort $c(x, y, z)$ wird häufig eine geschichtete Wasserstruktur $c(z)$ angenommen, bei der sich die Schallgeschwindigkeit nur in der Vertikalen ändert. Dies wird als sog. Schallgeschwindigkeitsprofil (engl. *sound velocity profile, SVP*) bezeichnet und ist in Abbildung 3.3 zusammen mit einem Temperaturverlauf exemplarisch abgebildet. Diese Schallgeschwindigkeit entlang der Vertikalen

wird in der Praxis meist mit folgenden drei Methoden gewonnen: Es kann eine Berechnung aus der Temperaturmessung erfolgen, die mittels vom Schiff abgeworfener Einweg-Abwurfsensoren (engl. *expendable bathythermograph, XBT*) erfolgt. Alternativ wird mit einem *moving vessel profiler* (MVP) gemessen, der vom fahrenden Schiff aus abgeworfen und wieder eingeholt wird. Das SVP kann (z.B. in AUVs) auch über Messungen von Leitfähigkeit, Temperatur und Wassertiefe mit sog. CTD-Sensoren (engl. *conductivity/temperature/depth*) gewonnen und zusammen mit den Sonarmessdaten abgelegt werden. Für verschiedene Meeresbereiche gibt es jahreszeitlich wechselnde Verläufe, die für die jeweilige Region typisch sind, z.B. »arktischer Ozean im Winter«, »tropischer Ozean im Sommer«. Der Zusammenhang, wie aus der Leitfähigkeit des Meerwassers der Salzgehalt bestimmt werden kann, ist in Jackson et al. [Jac07] gegeben.

Durch ein nicht-konstantes SVP wird die Ausbreitungsrichtung der Schallwellen beeinflusst. Die dadurch gekrümmten Schallpfade können zur Ausbildung von Schallkanälen führen. Dies wird in Abschnitt 4.1 und Abschnitt 3.4.3 näher betrachtet.

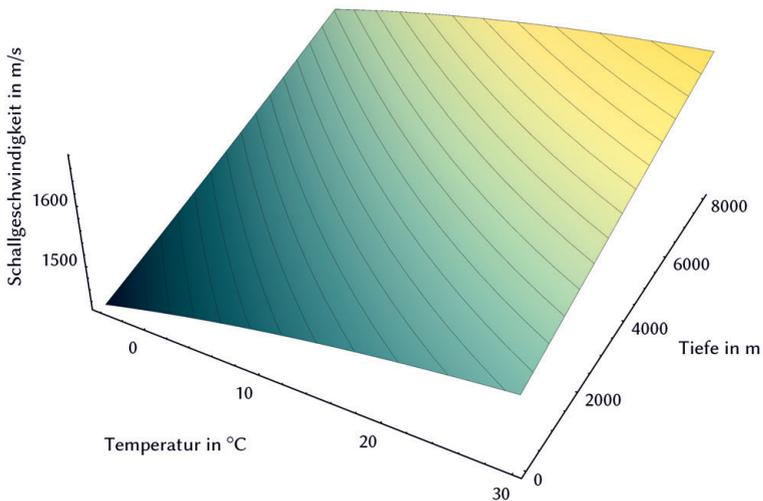


Abbildung 3.1: Schallgeschwindigkeit für Salzgehalt 3,5% abhängig von Temperatur und Tiefe.

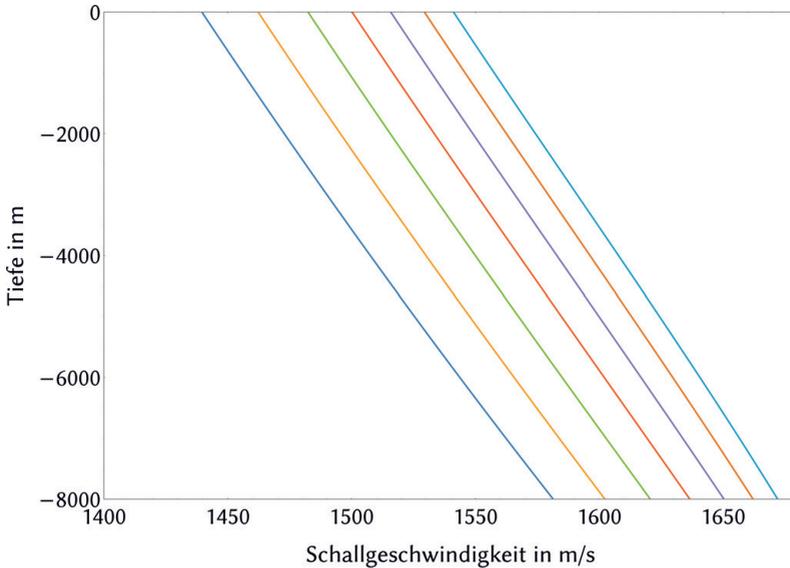


Abbildung 3.2: Schar über die Schallgeschwindigkeit für Salzgehalt 3,5% abhängig vom Druck für Temperaturen von $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (links) bis $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ (rechts) in Schritten von $5\text{ }^{\circ}\text{K}$.

Zusammenfassend kann man sagen, dass ab etwa 1 km Wassertiefe nur noch der lineare Anstieg mit dem Wasserdruck Einfluss hat. Temperatur und Salzgehalt können als konstant angenommen werden [Kra13]. Daher kann für Aktivitäten in der Nähe des Tiefsee-Meeressbodens die Schallgeschwindigkeit als praktisch konstant angesehen werden.

3.3 Akustische Wellengleichung

Durch die Wellengleichung wird die Fortpflanzung akustischer Wellen in Gasen und Flüssigkeiten beschrieben. Für eine ideale Flüssigkeit konstanter Dichte ρ ist sie für den Druck p in Gleichung (3.2) folgendermaßen gegeben [Lur10; Jen11]:

$$\Delta p = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2(x,y,z)} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}. \quad (3.2)$$

Dabei bezeichnet Δ den Laplace-Operator.

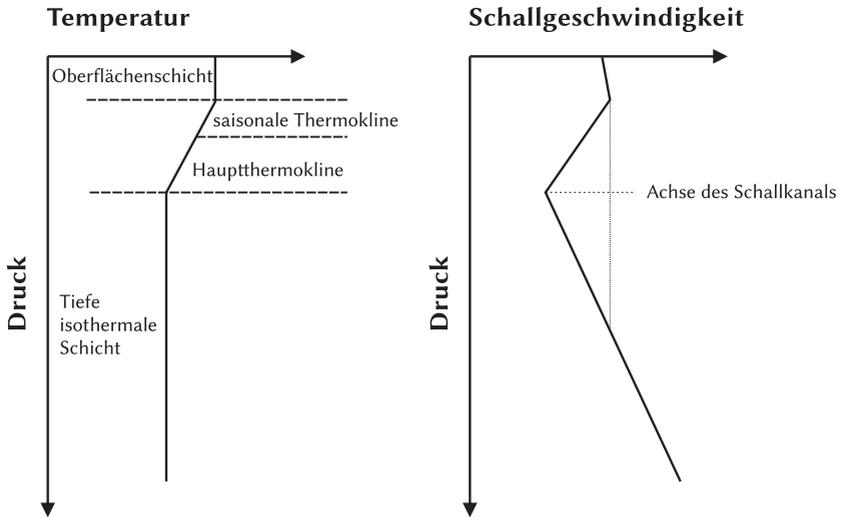


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung eines typischen Temperaturverlaufs im tieferreichenden Ozean in mittleren Breiten (links) und dem zugehörigen Schallgeschwindigkeitsprofil (rechts). Der Schallkanal ist in diesem Fall der SOFAR-Channel (siehe Abschnitt 3.4.3)

Für eine sinusförmige Welle mit Frequenz f_0 (harmonische Lösung) wird Gleichung (3.2) zur Helmholtz-Gleichung. Diese heißt auch zeitunabhängige Wellengleichung bzw. Frequenzbereich-Wellengleichung und ihre Darstellung ist [Lur10; Ett13]:

$$\Delta p + k^2(x, y, z)p = 0, \quad (3.3)$$

mit der Wellenzahl

$$k(x, y, z) := \frac{2\pi f_0}{c(x, y, z)} = \frac{\omega}{c(x, y, z)}, \quad (3.4)$$

und der Kreisfrequenz

$$\omega := 2\pi f_0. \quad (3.5)$$

Nimmt man an, dass ein homogenes Medium vorliegt, also die Schallgeschwindigkeit überall im Raum gleich ist (isotrope Schallausbreitung),

und beschränkt sich auf eine Ausbreitungsrichtung x , wird aus der Wellengleichung:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\omega^2}{c^2} p = 0. \quad (3.6)$$

Die Lösung für diese Gleichung ist eine Druckwelle der folgenden Form [Lur10]:

$$\begin{aligned} p(x, t) &= a_0 \exp\left(i\omega\left(t - \frac{x}{c}\right)\right) \\ &= a_0 \exp(i(\omega t - kx)). \end{aligned} \quad (3.7)$$

Das ist eine Druckwelle mit konstanter Amplitude a_0 und einer Phase, die nur von einer kartesischen Raumkoordinate abhängt, eine sog. ebene Welle (engl. *plane wave*). Die Ebenen gleicher Phase liegen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung.

3.3.1 Numerische Näherungen der Wellengleichung

Die Wellengleichung vollständig zu lösen erfordert die Lösung der Helmholtz-Gleichung (3.3). Dazu wäre aber vollständiges Wissen über das Schallgeschwindigkeitsfeld $c(x, y, z)$ sowie die Randbedingungen nötig.

Die Schallausbreitung ins und im Sediment, wo im Gegensatz zur Ausbreitung in Flüssigkeiten Scherwellen auftreten können [Lur10; Wil05], wird meist vernachlässigt. Es wird ausschließlich die Ausbreitung von Druckwellen in Flüssigkeiten modelliert, also die Ausbreitung von Longitudinalwellen. In der Modellierung wird durch die Vernachlässigung von Scherwellen der Meeresboden akustisch quasi als Flüssigkeit mit anderer Dichte und anderer Schallgeschwindigkeit betrachtet, was sich in der Praxis aber als realistische Näherung herausstellt [Wil05].

Jensen et al. [Jen11] beschreiben fünf Modelle für die Berechnung der Schallausbreitung unter Wasser: Fast field program (FFP), Normal mode (NM), Strahlgleichungen und parabolische Gleichungen (PE), finite Differenzen/ finite Elemente (FD/FE) [Jen11]. Per FFP kann man Nahfeldeffekte darstellen und Scherwellen berücksichtigen. Über NM-Methoden wird eine Zerlegung in stehende Wellen vorgenommen und ein Eigenwertproblem gelöst. Dadurch bekommt man Lösungen, die für alle Quellen- und Empfängerkonfigurationen gelten. PE-Methoden sind Fernfeldmethoden, die

zu jeder Schrittweite Fouriertransformationen verwenden, um Besselgleichungen zu lösen [Ros14]. FE-Methoden sind für hohe Frequenzen aufgrund des hohen Rechenaufwands nur im Nahbereich einsetzbar. Im Rahmen der ATR-Forschung gibt es einzelne Arbeiten dazu, etwa verwenden Nijhof et al. [Nij14] FE-Modelle, um bei teilweise im Sediment verschütteten Objekten die direkte Umgebung des Objekts akustisch zu simulieren, um eine möglichst realistische akustische Signatur des Objekts zu erhalten. Die Anwendung beschränkt sich dabei aus Rechenzeitgründen auf einen lokal eng begrenzten Bereich um das Objekt herum.

Für Sonare mit wenigen Kilohertz und höher ist Raytracing als Näherungslösung der Wellengleichung für unendlich hohe Frequenzen (Strahlnäherung) die praktikabelste Lösung. Die anderen Modelle werden zunehmend unterhalb etwa eines Kilohertz anwendbar [Jen11].

Raytracing

Für Kartenerstellungsaufgaben, wie sie in dieser Arbeit behandelt werden, werden Frequenzen verwendet, die mindestens zwei Größenordnungen höher liegen als der Einsatzbereich der anderen genannten Modelle. Daher wird in den Beiträgen dieser Arbeit ausschließlich Raytracing verwendet.

Die Approximation der Schallausbreitung durch Raytracing ist eine Hochfrequenznäherung [Gué11; Ros14]. Dazu werden von der Schallquelle Strahlen in Richtung der Wellenfrontnormalen im Fernfeld ausgesandt und ihr Weg durch die Szene verfolgt.

Raytracing ist bei der Bildsynthese optischer Szenen (engl. *rendering*) stark verbreitet und daher eine gut bekannte Methode mit vielen existierenden Werkzeugen. Durch ihre Flexibilität wird sie von verschiedenen Autoren auch in der akustischen Domäne zur Simulation eingesetzt. Der diesbezügliche Stand der Technik ist in Abschnitt 7.7 dargestellt. Insbesondere wird die Verwendung von Raytracing in verschiedenen Simulationsumgebungen in Abschnitt 7.7.2 näher vorgestellt. Die Verwendung von Raytracing in dieser Arbeit wird in Abschnitt 8.3 beschrieben.

Eine ausführliche Rechtfertigung zur Verwendung von Strahlen ist bereits in Tolstoy et al. [Tol66] oder auch in Jensen et al. [Jen11] und Guériot et al. [Gué11] gegeben. Hier wird gezeigt, dass die Eikonalgleichung in Strahlkoordinaten zu einer linearen Differentialgleichung wird und dadurch deutlich einfacher zu lösen ist. Die Eikonalgleichung ordnet jedem Punkt im

Ortsraum die Laufzeit der Welle zu. Linien gleicher Laufzeit lassen sich als Wellenfronten interpretieren [Mun09].

Eine Beschreibung, wie Raytracing in einem geschichteten Medium als Näherung für den Ozean durchgeführt werden kann, ist an vielen Stellen zu finden, etwa in [Lur10; Hod10; Jen11; Bel95].

3.3.2 Dezibelnotation und Referenzlevel

Die meisten akustischen Messungen werden in Dezibel (dB) angegeben. Dezibel sind mathematisch gesehen lediglich ein logarithmiertes Verhältnis zweier Größen. Absolute Werte können daher nur mithilfe eines Referenzwerts angegeben werden, der sehr oft vergessen oder ohne den Referenzabstand z. B. »re 1m« angegeben wird [Lur10].

Wenn nichts anderes angegeben ist, ist der Referenzdruck p_{ref} für Unterwassermessungen üblicherweise der Druck einer ebenen Welle mit $1\mu\text{Pa}$. Als Referenzabstand zur Quelle wird üblicherweise 1 Meter angenommen, weswegen die dB-Angaben meist als in »dB re $1\mu\text{Pa}$ re 1m« zu verstehen sind [Jen11; Lur10]. Der Referenzdruck an Luft beträgt $20\mu\text{Pa}$, was die Angaben schwierig macht, wenn beide Medien involviert sind, wie etwa bei Schaumkronen auf Wellen [Ain10]. Durch die unterschiedlichen Referenzwerte ist die gleiche Druckangabe in Wasser um $20\log(20) \approx 26$ dB höher, woran man sieht, dass die Angabe der Referenzwerte unumgänglich ist.

Die Intensität der Referenzdruckwelle mit $1\mu\text{Pa}$ beträgt $0,67 \cdot 10^{-18} \text{ W/m}^2$ und wird im Unterwasserbereich als Referenzintensität verwendet. Möchte man Aussagen über breitbandige Signale oder Rauschen tätigen, muss zusätzlich zur Intensität noch eine Bezugsbandbreite angegeben werden, z. B. die Referenzbandbreite »re 1Hz« [Jen11].

Als Messunsicherheit bei Unterwasser-Messungen ist derzeit etwa 1 dB Differenz erreichbar, was ca. 10 % Druckunterschied entspricht [Lur10].

3.3.3 Schalldruck und Intensität

Die akustische Intensität I ist der durchschnittliche Energiefluss pro Oberflächeneinheit und Zeit [Lur10; Jen11] und wird in Watt pro Quadratmeter für sinusförmige Signale wie folgt berechnet:

$$I = \frac{p_0^2}{2\rho c} = \frac{p_{RMS}^2}{\rho c}, \quad (3.8)$$

$$\text{mit } p_{RMS} = \frac{p_0}{\sqrt{2}}. \quad (3.9)$$

Dabei ist p_{RMS} das quadratische Mittel, also der Effektivwert der Sinusschwingung (engl. *root mean square, RMS*).

Manche Autoren unterscheiden zwischen Intensität als vektorieller Größe (als Produkt von Schalldruck und Schallschnelle) und dem durchschnittlichen quadratischen Druck Q (engl. *mean square pressure, MSP*) [Ain10]. Der mittlere quadratische Druck Q wird über eine Integrationszeit T bestimmt:

$$Q := \frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt. \quad (3.10)$$

Der Schalldruckpegel (engl. *sound pressure level, SPL*) ist der mittlere quadratische Druck in dB ausgedrückt:

$$SPL := 10 \log \frac{Q}{p_{ref}^2} = 20 \log \frac{p_{RMS}}{p_{ref}}. \quad (3.11)$$

Für eine ebene Welle, bei der Druck und Schnelle in Phase sind, ist der Betrag der Intensität dann aber auch so definiert wie in Gleichung (3.8). Daher wird die Intensität im Folgenden als Betragsgröße synonym zum MSP behandelt.

3.4 Ausbreitungsverlust

Der Ausbreitungsverlust (engl. *transmission loss, TL*) besteht aus der geometrischen Ausbreitungsdämpfung (engl. *spreading loss*) und der Dämpfung durch das Medium und wird üblicherweise in dB angegeben.

3.4.1 Geometrische Ausbreitungsdämpfung

Nach [Jen11] gibt der Ausbreitungsverlust das Verhältnis zwischen der Intensität $I(\mathbf{x})$ an einem Raumpunkt \mathbf{x} und der Referenzintensität I_0 im Abstand von 1 m von der Quelle an:

$$TL := -10 \log \frac{I(\mathbf{x})}{I_0} \quad (3.12)$$

$$= -20 \log \frac{|p(\mathbf{x})|}{p_0} \quad (\text{dB re 1 m}) . \quad (3.13)$$

Eine punktförmige Schallquelle erzeugt unter isotropen Ausbreitungsbedingungen eine Kugelwelle. Bei geringer Wassertiefe allerdings, bzw. wenn die Höhe der Wassersäule durch die Wellenfront erreicht ist, kann nicht mehr von kugelförmig-isotroper Ausbreitung gesprochen werden. Eine Zylinderwelle ist dann eine gute Näherung der Schallausbreitung. Für große Abstände zur Quelle können sowohl die Kugelwelle als auch die Zylinderwelle als ebene Welle angenähert werden. Bei verlustfreiem Medium ist die Intensität also invers proportional zur Oberfläche einer Kugel mit Radius r ($I \propto \frac{1}{4\pi r^2}$) bzw. eines Zylinders ($I \propto \frac{1}{2\pi r d_w}$). Das bedeutet für kugelförmige Ausbreitung in einem verlustfreien Medium:

$$TL = 20 \log r \quad (\text{dB re 1 m}) , \quad (3.14)$$

und für zylindrische Ausbreitung in einem verlustfreien Medium:

$$TL = 10 \log r \quad (\text{dB re 1 m}) . \quad (3.15)$$

Es erfolgt kugelförmige Ausbreitung für $r \ll d_w$ und zylindrische Ausbreitung für $r \gg d_w$.

Im Anwendungsfall eines Sidescan-Sonars in der Tiefsee sind die Reichweiten des Schalls stets erheblich kleiner als die Höhe der Wassersäule, so dass prinzipiell kugelförmige Ausbreitung angenommen werden kann.

3.4.2 Einfluss des Mediums

3.4.2.1 Absorption und Dispersion

Die Absorption von Schallwellen findet bereits in klarem Wasser durch die Viskosität des Wassers statt und wächst mit dem Quadrat der Frequenz [Lur10].

Zusätzlich enthält Meerwasser verschiedene anorganische Stoffe in gelöster Form. Diese haben Einfluss auf die akustischen Eigenschaften des Meerwassers. Während das hauptsächlich vorhandene Kochsalz (NaCl) die Absorptionseffekte sogar eher abschwächt, sind Magnesiumsulfat (MgSO_4), Borsäure

(H_3BO_3) und Magnesiumcarbonat (MgCO_3) die Haupteinflussfaktoren [Mel87]. Wäre das Meerwasser salzfrei, könnte eine 100Hz-Schallwelle den Globus 70 mal umkreisen, bis nur noch 10% der Anfangsschallenergie vorhanden wären, durch die gelösten Salze passiert das »schon« nach 10000km [Wil05].

Eine vereinfachte Formel für die ungefähre Absorption in Meerwasser ist in [Jen11] folgendermaßen gegeben (f in kHz):

$$\alpha := 3,3 \cdot 10^{-3} + \frac{0,11f^2}{1 + f^2} + \frac{44f^2}{4100 + f^2} + 3 \cdot 10^{-4} f^2, \quad (3.16)$$

wobei die zwei mittleren Teilterme für den Einfluss der Relaxation der anorganischen Salze stehen. Der letzte Teilterm stammt von der Viskosität klaren Wassers. Dabei stellt α den Intensitätsabsorptionskoeffizienten in dB/km dar. Der Funktionsgraph ist in Abbildung 3.4 abgebildet. Hohe Frequenzen werden also stärker gedämpft und besitzen deshalb eine geringere Reichweite. Es muss darauf geachtet werden, in welcher Einheit α angegeben wird [Lur10]. In der Praxis findet sich die Angabe sehr häufig in dB/km , es finden sich jedoch auch Werte in $\text{dB}/\text{kiloyard}$ [Li12] oder dB/m in der Literatur.

Die Absorption ist zudem abhängig vom Druck und wird mit zunehmender Tiefe geringer [Lur10]. Eine genauere Formel (François-Garrison-Formel) zur Berechnung des Absorptionskoeffizienten abhängig von Tiefe und Salzgehalt die in der Praxis sehr häufig verwendet wird findet sich in Anhang A.

Die Dispersion bezeichnet die Abhängigkeit der Phasengeschwindigkeit von der Wellenlänge. Die Änderung der Schallgeschwindigkeit $\Delta c = c_l - c$ in Relation zu einer Signalkomponente der Frequenz f aus einem Signalspektrum mit der oberen Grenzfrequenz f_l beträgt näherungsweise [Ler09]:

$$\Delta c = \frac{2c_l d_f}{f_l^3} \Delta f \quad \text{mit } \Delta f := f_l - f. \quad (3.17)$$

Wobei c_l die Schallgeschwindigkeit bei der Grenzfrequenz f_l darstellt, c die Schallgeschwindigkeit bei Frequenz f und d_f den Dispersionskoeffizienten angibt. Der Dispersionskoeffizient nimmt mit zunehmender Wassertiefe ab [Ler09].

In der vorliegenden Arbeit wird der Einfluss der Absorption und Dispersion nicht berücksichtigt. In den betrachteten Frequenzbereichen ist die Absorption zwar ein wichtiger Faktor, aber die Absorption durch die gelösten Salze bleibt in der Tiefsee ohnehin konstant und der Absorptionskoeffizient

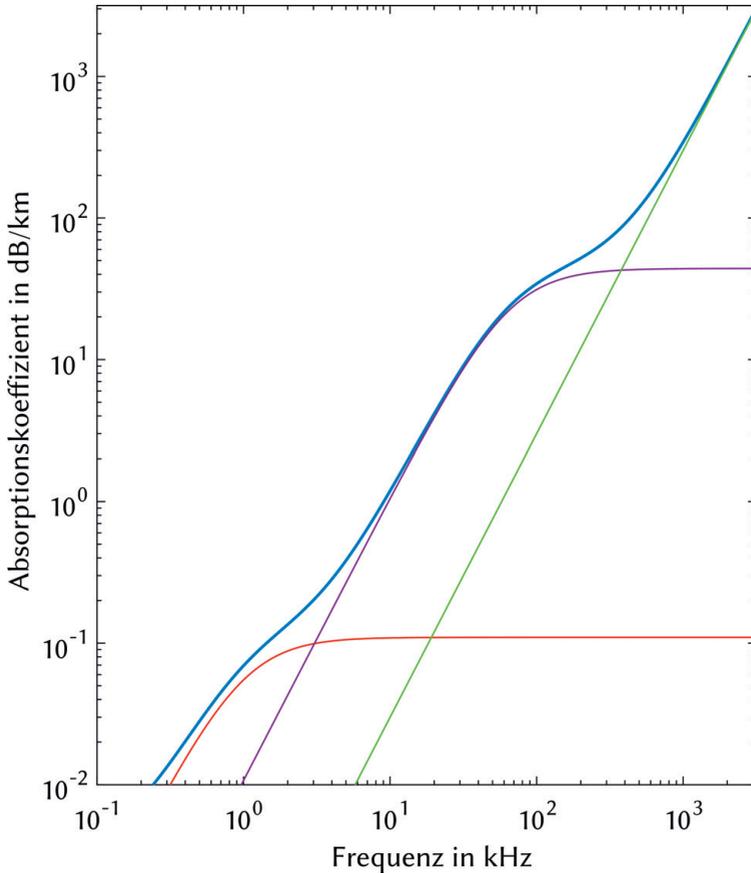


Abbildung 3.4: Absorptionskoeffizient abhängig von der Frequenz (blau). Die Teilbeiträge der Salze sind in rot und lila gezeichnet, der Beitrag klaren Wassers ist grün gezeichnet. Für hochfrequente Sonare ist nur noch der Beitrag klaren Wassers entscheidend.

verändert sich nur noch durch die Viskosität des Wassers. Bei Sonaren, die bei einer festen, hohen Frequenz arbeiten, ist der Absorptionskoeffizient dann konstant und degeneriert zu einer rein entfernungsabhängigen Abschwächung. Dies ändert an der prinzipiellen Arbeitsweise der Verfahren nichts und könnte bei Bedarf unkompliziert hinzugefügt werden.

Da der Dispersionskoeffizient mit tieferem Wasser kleiner wird, sind die Auswirkungen in der Tiefsee gering.

Bei kugelförmiger Ausbreitung ergibt sich unter Berücksichtigung der Absorption dann

$$TL = 20 \log r + \alpha r . \quad (3.18)$$

Für den Weg zu einem Streuzentrum auf einer Oberfläche (siehe Abschnitt 4.2.5) und wieder zurück (engl. *two-way travel time*) lässt sich der Ausbreitungsverlust TL durch zweifache Anwendung von Gleichung (3.18) beschreiben [Lur10]:

$$2TL = 40 \log r + 2\alpha r . \quad (3.19)$$

Mischformen mit $30 \log r$ sind möglich, wenn teilweise zylindrische Abstrahlung berücksichtigt werden soll, wie bei geringer Wassertiefe oder in einem Schallkanal [Ett13].

3.4.2.2 Kavitation

Kavitation bezeichnet den Vorgang, wenn im Wasser durch große Kräfte die normalerweise untereinander zusammenhängenden Wassermoleküle auseinander gerissen werden, also der Dampfdruck der Flüssigkeit durch den Einfluss der negativen Druckamplitude unterschritten wird. Das kann bei einem Sonarwandler passieren, wenn er mit sehr großer Leistung betrieben wird. Durch diesen Effekt ist begrenzt, wieviel Schallenergie überhaupt ins Wasser abgegeben werden kann.

Wann Kavitation auftritt ist abhängig von den wirkenden Kräften, dem Wasserdruck und der Wassertemperatur. Wie die Kavitation von Frequenz, bzw. Pulslänge und Leistung abhängt, ist in Hodges [Hod10] dargestellt, z. B. tritt sie bei 1 bar Druck bei ca. 4 kW/m^2 auf, was etwa 217 dB (re $1 \mu\text{Pa}$) entspricht [Urb02]. Die Kavitation ist zusätzlich abhängig von der Pulsdauer: Bei sehr kurzen Pulsen (z. B. 0,5 ms) tritt sie erst bei höherer Sonarleistung auf als bei längeren Pulsen (z. B. 10 ms) [Hod10; Wai02]. Mehr Informationen zu Kavitationsschwellen und weitere Beispiele können in den Büchern von Hodges [Hod10] bzw. Waite [Wai02] nachgelesen werden. Sonarsensoren arbeiten daher mit Schalldrücken gerade unterhalb der Kavitationsgrenze, um möglichst viel Leistung ins Wasser abgeben zu können. Beispiele für

Schalldrücke kommerziell erhältlicher Sonare finden sich beispielsweise in [Ain10] oder [Bel95].

In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass keine Kavitationseffekte bei der Schallerzeugung auftreten.

3.4.2.3 Dämpfung durch Partikel und Mikroblasen

Etter [Ett13] gibt zur Dämpfung durch Partikel und Mikroblasen folgende Einschätzung: Die Dämpfung durch suspendierte Partikel und Mikroblasen stellt einen wichtigen Beitrag zur Gesamtdämpfung dar. Dies ist vor allem in Küstengewässern und an der Wasseroberfläche relevant, wo durch Wellen, Wind und Schifffahrt Mikroblasen entstehen und wo insbesondere an Flussdeltas größere Sedimenteinträge stattfinden. Mikroblasen mit Radien von 10–60 μm sind im Frequenzbereich von 50–300 kHz resonant. Dieser Frequenzbereich ist für Kartierungsaufgaben mit Sidescan-Sonaren wichtig.

Fein verteilte Feststoffpartikel dämpfen einerseits durch viskose Absorption, andererseits durch Streuung. Von der Größenordnung her ist die Dämpfung ähnlich stark wie der Einfluss von Magnesiumsulfat bei Frequenzen bis 100 kHz [Jac07].

Daher sind diese Einflüsse für hochfrequente Sonarsysteme prinzipiell zu berücksichtigen. In der Tiefsee finden sich jedoch üblicherweise nur wenige suspendierte Partikel [Lam04] und Mikroblasen sind unterhalb von 10–20 m Wassertiefe auch zu vernachlässigen [Lur10]. Ansonsten treten Mikroblasen allenfalls am Meeresboden bei entsprechender biochemischer Aktivität auf. Da diese in der Tiefsee gering ist, können Mikroblasen bei der Modellierung der Schallausbreitung ebenfalls vernachlässigt werden.

3.4.3 Schallkanäle und Deep Scattering Layer

In sehr großen Teilen der Weltmeere findet sich im Schallgeschwindigkeitsprofil (siehe Abbildung 3.3) ein Minimum bei 800–1200 m Tiefe [Mun09]. Bedingt durch dieses SVP findet eine nicht-isotrope Ausbreitung der Schallwellen derart statt, dass Schallwellen immer wieder zum Minimum hin gebrochen werden. Dadurch werden sie Schallstrahlen wellenartig im Schallkanal verformt. Das sorgt dafür, dass Schall innerhalb dieses Kanals sehr verlustarm transportiert wird. Dieser Schallkanal heißt SOFAR-Channel (engl. *sound fixing and ranging*) oder oft auch einfach *deep channel*.

Eine ähnliche Situation ergibt sich in polaren Gewässern, wenn das Schallgeschwindigkeitsminimum durch die niederen Temperaturen an der Oberfläche liegt. Durch die mit der Tiefe zunehmende Schallgeschwindigkeit bildet sich ein Oberflächenkanal (engl. *surface duct*) aus, bei dem Schall an der Wasseroberfläche total reflektiert wird und Schall aus tieferen Schichten wieder nach oben gebrochen wird.

Man kann sich diese Kanäle ähnlich zum atmosphärischen Kurzwellenkanal vorstellen, der durch die Reflexion der elektromagnetischen Wellen an der Ionosphäre zustande kommt.

Da durch die Dämpfung im Wasser nur niedrige Frequenzen nennenswerte Strecken zurücklegen können, sind die Schallkanäle besonders für diese relevant. Es wird vermutet, dass Meeressäuger diesen Schallkanal verwenden, um über große Distanzen kommunizieren zu können [Ain10], aber auch bei militärischen Anwendungen oder bei akustischer Unterwasser-Datenübertragung ist er von Interesse.

Der SOFAR-Kanal ist nicht in allen geographischen Breiten gleich effektiv, da entsprechend des SVP die Schallachse von ca. 1000 m Tiefe in den mittleren Breiten bis zur Oberfläche in den Polarregionen wandern kann [Jen11].

Eine weitere akustisch einflussreiche Wasserschicht ist die tiefe Streuschicht (engl. *deep scattering layer*, *DSL*), die durch lebende Organismen wie Plankton und kleine Fische geprägt ist und rückstreuende Effekte hat (Schallrückstreuung siehe Abschnitt 4.2). Tagsüber ist sie in Tiefen zwischen 200–600 m zu finden, nachts bei ca. 100 m. Sie ist am stärksten am Äquator ausgeprägt, an den Polen am wenigsten stark [Lur10]. Bis etwa 20 kHz sind die resonanten Schwimmblasen der Fische für die Rückstreuung relevant, bei höheren Frequenzen die Streuung an Plankton.

Beide Schichten sind für die Sidescan-Sonardatenaufnahme durch ein AUV in der Tiefsee akustisch nicht relevant, wohl aber, wenn von der Oberfläche aus Messungen bis zum Meeresboden durchgeführt werden oder USBL zur Navigationsunterstützung (Abschnitt 7.1.4.3) zum Einsatz kommt.

Schall an Grenzflächen

An Grenzflächen können bei Schallwellen Reflexion, Transmission, Brechung und Streuung auftreten, bei Hindernissen kleiner und gleich der Wellenlänge auch Beugung [Urb02]. Die Grundlagen für das Verhalten von Schall an Grenzflächen werden in diesem Kapitel gegeben. Der Aufnahmeprozess des Sonars wird später in Kapitel 6 beschrieben.

4.1 Snell-Descartes'sches Brechungsgesetz an Schichtgrenzen

Denkt man sich den Ozean als Ansammlung von j sehr dünnen horizontalen Schichten unterschiedlicher Schallgeschwindigkeit c_j , kann an der Grenzfläche zwischen den Schichten das Snell-Descartes'sche Brechungsgesetz (engl. *Snell's law*) angewendet werden (siehe Abbildung 4.1) und damit die Schallausbreitung über die gesamte Wassersäule beschrieben werden. Die Annahme einer horizontalen Schichtung ist eine gute Approximation an die tatsächlich vorliegenden Gegebenheiten [Jen11].

Die Richtungsänderung einer Schallwelle an der Grenzfläche hängt von den Schallgeschwindigkeiten der durchlaufenen Medien ab. Die horizontale Phasengeschwindigkeit v_{ph} muss in beiden Medien entlang der Grenzfläche gleich sein [Urb02].

$$v_{\text{ph}} := \frac{c_1}{\sin \phi_1} = \frac{c_2}{\sin \phi_2}. \quad (4.1)$$

Die gängige Praxis in der Unterwasserakustik ist, die Winkel von der Horizontalen statt zum Lot hin zu messen (Winkel θ in Abbildung 4.1), was von der Konvention in der Optik und Elektrotechnik abweicht [Jac07]. Im Deutschen findet sich dafür der Begriff Streifwinkel (engl. *grazing angle*), manchmal auch Glanzwinkel. Mit diesen in der Unterwasserwelt üblichen Streifwinkeln gilt Gleichung (4.1) mit Cosinus statt Sinus [Ett13].

Der sog. kritische Winkel (θ_c bzw. ϕ_c) ist der Winkel, unter dem die Brechung genau in die Horizontale erfolgt. Er hängt nur von den Schallgeschwindigkeiten der beteiligten Medien ab. Bei noch flacherem Einfall zur Medien-grenze findet dann Totalreflexion statt:

$$\theta_c := \arccos\left(\frac{c_1}{c_2}\right) \quad \text{bzw.} \quad \phi_c := \arcsin\left(\frac{c_1}{c_2}\right). \quad (4.2)$$

Ist die Schallgeschwindigkeit in Medium 2 nicht höher als in Medium 1, existiert kein kritischer Winkel.

Beim Übergang zu einer Schicht mit höherer Schallgeschwindigkeit wird der Schall vom Lot weggebrochen. Jensen et al. [Jen11] formulieren es salopp so, dass daraus im geschichteten Ozean resultiert, dass sich die Strahlen von Gebieten höherer Schallgeschwindigkeit abwenden, wie es der Fall ist, wenn sie sich dem Meeresboden oder der Wasseroberfläche nähern wo die Schallgeschwindigkeit üblicherweise höher ist. Für große Abstände und hohe Frequenzen bei tiefem Wasser braucht man durch die aufwärts gerichtete Brechung die Interaktion mit dem Boden sogar gar nicht zu betrachten [Jen11].

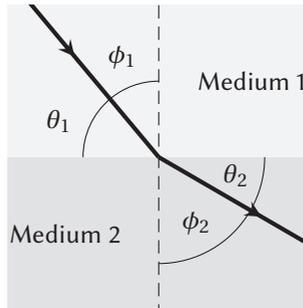


Abbildung 4.1: Snell-Descartes'sches Brechungsgesetz. Medium 2 hat im Bild eine höhere Schallgeschwindigkeit.

4.2 Reflexion und Streuung

4.2.1 Akustische Impedanz

Die Akustische Impedanz Ψ oder Wellenwiderstand eines Mediums ist folgendermaßen definiert [Jen11]:

$$\Psi := \rho c, \quad (4.3)$$

wobei ρ die Dichte des Mediums und c seine Schallgeschwindigkeit kennzeichnet. Die akustische Impedanz ist insbesondere unabhängig von der Frequenz.

Die Impedanz wird in Rayleigh (abgeleitete SI-Einheit, kurz Rayl, entsprechend $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$) gemessen, und bringt den Schalldruck mit der Partikelbewegung in Verbindung. Wasser besitzt mit $\Psi \approx 1.53 \cdot 10^6$ Rayl eine hohe Impedanz, verglichen mit Luft und $\Psi \approx 0.42 \cdot 10^3$ Rayl [Lur10].

Eine Tabelle mit Impedanzwerten für viele Sonarschallwandlermaterialien ist in [She07] zu finden.

4.2.2 Impedanzkontrast und Reflexionskoeffizient

Die Impedanz spielt eine wesentliche Rolle für den Anteil des zurückgeworfenen Schalls, der von einem Sensor empfangen werden kann. Bei stark unterschiedlicher akustischer Impedanz zwischen den Medien findet nicht nur Brechung ins andere Medium statt, sondern es findet – zumindest teilweise – Reflexion statt.

Aufgrund der Frequenzunabhängigkeit der Impedanz haben nur wenige Objekte im Unterwasserbereich eine ausgeprägt frequenzabhängige Rückstreuung, sozusagen eine »Schallfarbe«. Eine Ausnahme sind Gasblasen mit scharfer Resonanzfrequenz [Wil05].

Welcher Anteil transmittiert bzw. reflektiert wird, wird durch den (Rayleigh-)Reflexionskoeffizienten $V(\phi)$ und den Transmissionskoeffizienten $W(\phi)$ beschrieben. Beide Koeffizienten sind als das Verhältnis des Schalldrucks der jeweiligen Welle zu dem der einfallenden Welle (Winkel zum Lot hin gemessen) definiert [Mül04]:

$$V(\phi) := \frac{\varrho_t c_t \cos \phi_r - \varrho_r c_r \cos \phi_t}{\varrho_t c_t \cos \phi_r + \varrho_r c_r \cos \phi_t} = \frac{\Psi_t^{\text{eff}}(\phi) - \Psi_r^{\text{eff}}(\phi)}{\Psi_t^{\text{eff}}(\phi) + \Psi_r^{\text{eff}}(\phi)}, \quad (4.4)$$

$$\text{mit } \Psi_i^{\text{eff}}(\phi) := \frac{\varrho_i c_i}{\cos \phi_i} \quad \text{für } i \in \{r, t\}, \quad (4.5)$$

$$\text{und } W(\phi) := \frac{2\varrho_t c_t \cos \phi_r}{\varrho_t c_t \cos \phi_r + \varrho_r c_r \cos \phi_t} = \frac{2\Psi_t^{\text{eff}}(\phi)}{\Psi_t^{\text{eff}}(\phi) + \Psi_r^{\text{eff}}(\phi)} = 1 + V. \quad (4.6)$$

Durch $\Psi^{\text{eff}}(\phi)$ ist die sog. effektive Impedanz angegeben. Die Indices r und t stehen für »reflektiert« und »transmittiert«.

Wenn sich der Reflexionskoeffizient $V(\phi)$ eins annähert (Gleichung (4.4)), erfolgt Totalreflexion. Die Wasseroberfläche kommt dieser idealen Grenze beispielsweise ziemlich nahe: Die Impedanz von Luft liegt mehr als 3 Größenordnungen unter derjenigen von Wasser (Abschnitt 4.2.1).

Bei größeren Winkeln (zum Lot) als Totalreflexion ist der Transmissionskoeffizient nicht null, sondern komplex: Es wird eine evaneszente Welle ins zweite Medium übertragen aber mit imaginärem Winkel und die Welle enthält keine Energie [Lur10].

Wenn der Übergang zwischen zwei Materialien derart ist, dass sich Dichteänderung und Schallgeschwindigkeitsänderung ausgleichen, ist die Grenze für die Schallwellen unsichtbar. In normalem Sediment ist es im Allgemeinen eher umgekehrt: die Stoffe mit höherer Dichte haben auch eine höhere Schallgeschwindigkeit, so dass Reflexion auftritt [Wil05]. Das ist jedoch nicht immer der Fall. In [APL94] wird etwa betont, dass die oberen Zentimeter des Sediments einen Gradienten von wässrig nach fest aufweisen können, insbesondere bei Schlick- und Tonsedimenten. Wie sich das auf das Rückstreuverhalten auswirkt, wird in Abschnitt 4.2.4 näher beschrieben.

Bei einer Grenze zu einem festen aber elastischen Medium ist die Brechung komplizierter, weil nicht nur Druckwellen, sondern auch Scherwellen entstehen können [Lur10]. Bei vielen Betrachtungen zur Rückstreuung (wie bereits in Abschnitt 3.3.1 angedeutet) wird das Sediment am Meeresboden ohne Scherkräfte, also gewissermaßen als Flüssigkeit modelliert. Das wird in der vorliegenden Arbeit ebenso gehandhabt.

In dieser Arbeit wird Volumenstreuung (engl. *volume scattering*), also Reflexion von innerhalb des Meeresbodens, nicht gesondert betrachtet. Volumenstreuung sorgt bei den hohen Frequenzen eines Sidescan-Sonars

vor allem dafür, dass die Streuung viel diffuser ist als durch ein reines Oberflächenmodell vorhergesagt. Dies wird in Abschnitt 4.2.4 weiter ausgeführt.

4.2.3 Spiegelnde Reflexion und Rauheit

Grundsätzlich sind die Wellenlängen so groß (z. B. 1,5 cm bei 100 kHz), dass vor allem bei ebenem Meeresboden ein sehr großer Teil der Schallenergie kohärent in Richtung des Ausfallswinkels reflektiert (gespiegelt) wird, was insbesondere bei Schallaufnahmen unter Winkeln wie beim Sidescan-Sonar nachteilig zum Tragen kommt. Es ist noch nicht vollständig geklärt, wie sich das erhaltene Echo bei solch flachen Sedimenten zusammensetzt, da die Sedimentbestandteile gegenüber der Wellenlänge immer noch als klein zu betrachten sind und die Oberfläche daher eigentlich einen perfekten Spiegel darstellt. Man nimmt an, dass in den oberen Zentimetern des Sediments Streuzentren liegen, die zu Inhomogenitäten der Rückstreuung führen. Dadurch ist das Echo stärker als eigentlich erwartet [Wil05].

Der Begriff der Rauheit ist abhängig von der verwendeten Sonarwellenlänge zu sehen, und wird beispielsweise durch den Rayleigh-Parameter Γ wie in [Lur10] beschrieben:

$$\Gamma := 2 \frac{2\pi}{\lambda} h \cos \phi_i, \quad (4.7)$$

mit h für die Höhe des Streukörpers bzw. als RMS-Höhenwert der Oberfläche (Effektivwert der Rauigkeit) und Einfallswinkel ϕ_i . Eine Oberfläche gilt als glatt bei $\Gamma \ll 1$ und als rau bei $\Gamma \gg 1$ [Hat09].

Mithilfe des Rayleigh-Parameters lässt sich der Reflexionsgrad für raue Oberflächen und somit die in die Richtung des ausfallenden Strahls gemäß Reflexionsgesetz (»Spiegelrichtung«) gestreute Schallintensität abschätzen. Näherungsweise kann der Anteil der gespiegelten Reflexion folgendermaßen angegeben werden [Urb02; Ber84; Hat09]:

$$V_c(\phi) := V(\phi) \cdot \exp(-\Gamma^2). \quad (4.8)$$

Durch $V(\phi)$ ist der Reflexionsgrad bei vollständig glatter Oberfläche bezeichnet, mit $V_c(\phi)$ wird der durch die Rauheit abgeschwächte gespiegelte Anteil bezeichnet.

Jackson et al. [Jac07] nennt noch folgende Besonderheit: Durch Wasserbewegungen (hydrodynamisch) induzierte Rauheit tendiere dazu anisotrop zu sein, wohingegen durch Lebewesen (biologisch) induzierte Rauheit eher isotropen Charakter hat.

Sedimenttypen

Der Meeresboden ist je nach Ort mit unterschiedlichen Sedimenten bedeckt. Nach Partikelgröße von grob nach fein geordnet sind das vereinfacht folgende Kategorien: Felsen, Steine, Kies, Grobsand, (mittlerer) Sand, Feinsand, Schluff/Schlick, Ton/Lehm [Lur10]. Zwischenkategorien wie »sandiger Schlick« existieren auch, werden hier aber nicht aufgezählt. Über die unterschiedliche Nomenklatur mit den entsprechenden Definitionen gibt [Hod10] einen Überblick. Dort sind auch die Sedimente mit ihren charakteristischen Korngrößen tabelliert. Die klassische Einteilung nach Wentworth ist in [Pop04] zu finden.

Die Partikelgrößen sorgen schon allein durch ihre unterschiedliche Größe relativ zur Wellenlänge für unterschiedliches akustisches Reflexionsverhalten (siehe Gleichung (4.8)). Durch biologisch-organische Materie am Meeresboden ändern sich die Reflexionseigenschaften zusätzlich.

Rein von der Rauheit der Oberfläche her gesehen, ist für ein Sidescan-Sonar bei sehr feinen Schlick- und Schlamm-sedimenten ein großer Anteil an spiegelnder Reflexion weg vom Sensor zu erwarten.

4.2.4 Eindringtiefe und Frequenz

Sehr poröse Sedimente wie Schlick- und Tonböden haben im Gegensatz zu beispielsweise Sandböden einen geringen akustischen Impedanzkontrast zum Wasser, weswegen die Sedimentgrenze kein besonders ausgeprägter Rückstreuer ist. Dadurch dringt ein nicht zu vernachlässigender Teil der einfallenden Energie in den Meeresboden ein. Die Absorption im Sediment ist allerdings mit $0,1 - 1$ dB pro Wellenlänge bzw. $1 - 100$ dB/m sehr viel höher als im Wasser, so dass nur niedrige Frequenzen (ein paar kHz und darunter) nennenswert weit kommen [Lur10; Jac86]. Der tiefer eindringende Schall wird dann vornehmlich an Material-Heterogenitäten gestreut und weniger durch die Rauheit [Jac07]. Dämpfungswerte im Sediment für verschiedene Frequenzen sind in [Jac07] angegeben.

Bei den für Kartenerstellung üblichen Frequenzen, setzt sich die Rückstreuung also aus zwei Hauptbestandteilen zusammen: Rückstreuung vom Relief und von Volumen-Heterogenitäten [Lur10].

Bei Einfallswinkeln kleiner (flacher) als der kritische Winkel wird die Grenzschicht (zumindest bei Sand) akustisch durchlässiger und es findet mit kleinerem Streifwinkel ein größerer Anteil an Volumenstreuung statt. Bei Ton- und Schlicksediment ist die Schallgeschwindigkeit sogar langsamer als in Wasser, weshalb es keinen kritischen Winkel gibt. Hier dominiert die Volumenstreuung die Rückstreuung sogar [Jac07].

Rückstreumodelle, die diese (und weitere) Unterscheidungen treffen, sind in Abschnitt 4.2.7 noch näher ausgeführt. In [Jac07] wird dabei betont, dass man in der Realität nicht immer klar zwischen Rauheitsstreuung und Volumenstreuung trennen kann. Allerdings beinhalten die Oberflächenrückstreumodelle oft empirische Anteile, die sich durch Volumenstreuung erklären lassen [Jac86].

Volumenstreuung wird im Folgenden nicht gesondert betrachtet, die im weiteren genannten Rückstreumodelle sind Oberflächenrückstreumodelle, die versuchen, den Effekt der Volumenstreuung empirisch nachzubilden.

4.2.5 Rückstreuung der Oberfläche

Bei sog. monostatischer Modellierung des Sonars wird davon ausgegangen, dass sich Sender und Empfänger am gleichen Ort befinden (engl. *backscatter*), bistatische Modelle trennen dies [Ett13; APL94]. Das bistatische Modell ist in Abbildung 4.2 mit Vorgriff auf die Bezeichnungen der Sonargleichung (Abschnitt 4.2.8) dargestellt. Letztlich stellt bistatische Streuung (engl. *bistatic scattering*) eine Generalisierung des Backscatter-Modells dar: Statt eines identischen Einfalls- und Rückstreuwinkels werden drei Winkel benötigt: Die Richtung der einfallenden Schallenergie wird als Inzidenz-Streifwinkel θ_i (zur Bodenebene), die Richtung der ausfallenden Schallenergie dementsprechend als Streu-Streifwinkel θ_s (zur Bodenebene) und der bistatische Winkel mit ϕ_{bss} [Jac07] bezeichnet. Dies ist in Abbildung 4.3 dargestellt.

Für ebenen, nicht-rauen Meeresboden findet die Reflexion in der spiegelnden Richtung (Abschnitt 4.2.3) statt. Das heißt, dass Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel gilt und der bistatische Winkel $\phi_{bss} = 0$ ist. Dieser Fall wird im Folgenden weiter betrachtet.

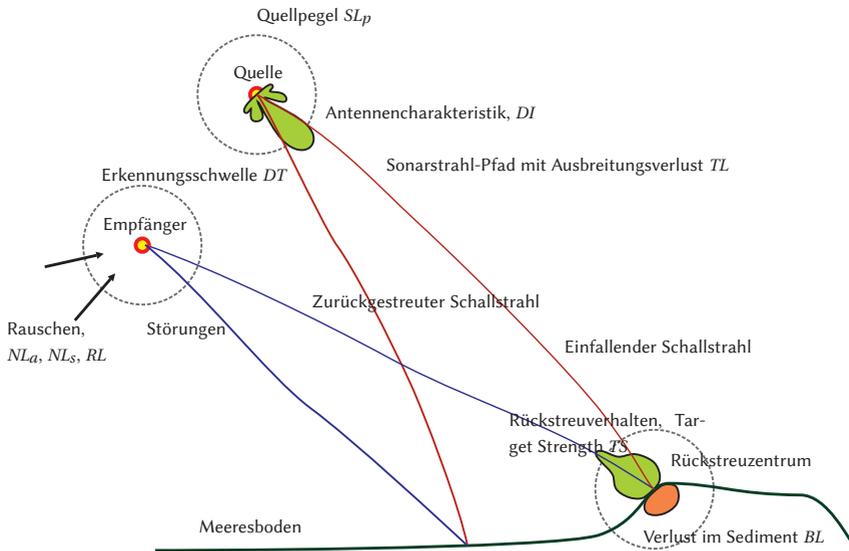


Abbildung 4.2: Geometrie der bistatischen Rückstreuung an einem Oberflächenelement.

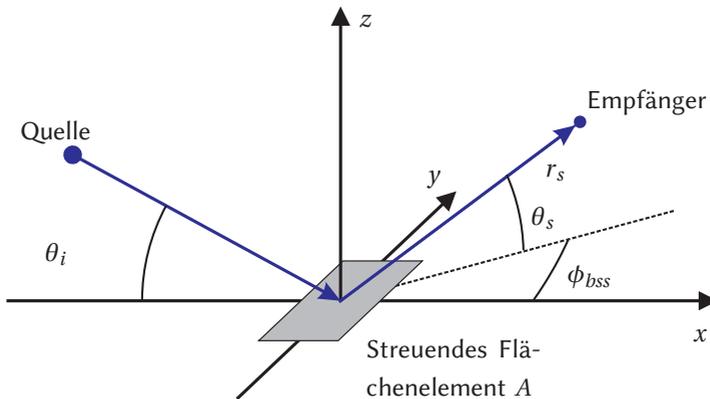


Abbildung 4.3: Geometrie der bistatischen Streuung an einem Oberflächenelement.

In der folgenden Betrachtung nach Lurton [Lur10] treffe eine ebene Welle die Fläche A_1 einer rauen Oberfläche unter Winkel θ_i . Ein Teil $\eta(\theta_i)$ der auf der Fläche einfallenden Schalleistung P_i wird weder auf den Untergrund übertragen noch spiegelnd-kohärent reflektiert, sondern in den Halbraum oberhalb der Oberfläche gestreut:

$$P_i := AI_i \cos\theta_i \quad (4.9)$$

$$\eta(\theta_i) := \int G(\theta_i, \theta_s) d\theta_s. \quad (4.10)$$

Der Verlust durch Transmission ins Sediment (engl. *bottom loss, reflection loss*) wird nicht gesondert betrachtet. Die Verteilung auf den Halbraum ist durch die Streufunktion $G(\theta_i, \theta_s)$ gegeben, die (ähnlich einer BRDF im Optischen) charakteristisch für die Oberfläche ist. $G(\theta_i, \theta_s)$ beschreibt also die Intensitätsverteilung über den Streuwinkel. Das Verhältnis der gestreuten und einfallenden Intensitäten I_s und I_i wird mit $\sigma_s(\theta_i, \theta_s)$ bezeichnet:

$$\sigma_s(\theta_i, \theta_s) := \frac{I_s}{I_i} r_{1m}^2 = A_1 \cos\theta_i G(\theta_i, \theta_s), \quad (4.11)$$

wobei r_{1m} den Referenzabstand und A_1 die Referenzfläche bezeichnet. $\sigma_s(\theta_i, \theta_s)$ heißt im Deutschen Streugrad und wird im Englischen als (engl. *bistatic scattering cross-section*) bezeichnet [Jac07], was unintuitiv ist, da der Rückstreugrad einheitenlos ist.

Beim bistatischen Fall in der Praxis wird das Signal eines Senders z. B. von einer Hydrophontkette oder von einem anderen Fahrzeug aufgenommen, wobei die örtliche Referenzierung von Sender und Empfänger für die korrekte Interpretation der Daten wichtig ist [Blo09]. Beispielsweise messen Dong et al. den *bottom loss* experimentell mit zwei Schiffen über mehrere Kilometer bei 8 Hz [Don13], um die Sedimenteigenschaften zu bestimmen.

Jackson et al. [Jac07] betonen, dass die Stärke der Rückstreuung nicht von der Messanordnung oder den Messsystemparametern wie Pulslänge oder Quellenschalldruck abhängt. Auch die Eigenschaften der Wassersäule heben sich auf, wenn die Ausbreitung von der Quelle zum Meeresboden und zurück zum Empfänger sorgfältig modelliert wurde. Bei den Autoren findet sich auch eine erweiterte Formulierung des Streugrads (engl. *scattering cross-section*) für den bistatischen Fall.

Hat der Meeresboden eine Vorzugsrichtung, wie es beispielsweise bei einem Sandwellenfeld der Fall wäre, wird noch ein Winkel ϕ_{bsi} für das einfallende Schallfeld gebraucht [Jac07].

Für den meistverwendeten Fall der Rückstreuung (engl. *backscatter*) gilt $\theta_s = \theta_i$ sowie $\phi_{bss} = \pi$ und der Ausdruck wird zum (monostatischen) Rückstreugrad (engl. *backscattering cross-section*) $\sigma_{bs}(\theta_i)$:

$$\sigma_{bs}(\theta_i) := \sigma(\theta_i, \theta_i). \quad (4.12)$$

Der Rückstreugrad hängt für beliebig geformte Ziele von den Krümmungsradien der Oberflächenelemente ab: Wenn diese deutlich größer sind als die Wellenlänge, kann man mit geometrischer Schallausbreitung approximieren [Lur10]. Auf einzelne Streuzentren, also Objekte bezogen, heißt die Größe auch Zielreflexionsgrad. Das zurückgestreute Feld hängt von der spiegelnden Reflexion bei Einfall nahe des Normalenvektors ab während bei flachen Auftreffwinkeln eine Menge von Streuzentren (engl. *scatterers*) verteilt gemäß der Mikroskalen-Rauheit (engl. *microscale roughness*) für das Signal verantwortlich ist. Mehr Details dazu werden bei den Rückstreu- modellen in Abschnitt 4.2.7 gegeben. In logarithmischer dB-Form heißt der Rückstreu- grad dann Rückstreumaß (TS_u) oder Zielmaß (TS), je nachdem, ob die flächennormierte Variante oder die auf ein Objekt bezogene Variante gemeint ist. Im Englischen spricht man entsprechend von *target strength* oder auch *backscattering strength* bezeichnet:

$$TS_u := 10 \log \frac{\sigma_{bs}}{r_{1m}^2} = 10 \log \frac{\sigma_{bs}}{A_1}, \quad (4.13)$$

$$TS := 10 \log \left(\frac{I_{bs}}{I_i} \right), \quad (4.14)$$

$$TS = TS_u + 10 \log \frac{A}{A_1} \quad (4.15)$$

Häufig wird TS in dB ohne Bezug auf die Fläche angegeben [Lur10].

Ist ein Streuzentrum kugelförmig und kleiner als die Wellenlänge, sinkt der Rückstreu- grad bei weiterer Verringerung des Kugelradius mit der sechsten Potenz [Lur10]:

$$\sigma_{bs}(\theta_i) = \frac{25}{36} k^4 r^6 \quad (4.16)$$

Weiterführende Literatur über theoretische Betrachtungen zum akustischen Reflexionsverhalten verschiedener geometrischer Unterwasserstrukturen ist z.B. in Skelton et al. [Ske97] zu finden.

In dieser Arbeit wird immer vom monostatischen Fall ausgegangen, dass also die Position der Schallquelle immer auch die Empfangsposition ist.

4.2.6 Lambert'sches Gesetz

Das Lambert'sche Gesetz beschreibt das Rückstreuverhalten einer voll diffus reflektierenden Oberfläche, im Optischen kommt dem z. B. ein Blatt Papier recht nah. Die folgende Herleitung orientiert sich an Lurton [Lur10].

Sei für eine raue Oberfläche sowohl $G(\theta_i, \theta_s)$ als auch $\eta(\theta_i)$ unabhängig von den Winkeln sind, gilt $\eta(\theta_i) = \eta_0$ und $G(\theta_i, \theta_s) = \eta_0/2\pi$. Dabei soll keine Energie an das darunterliegende Medium abgegeben werden. Mit diesen Annahmen kommt man zum *Lommel-Seeliger-Gesetz* für den Streugrad $\sigma_s(\theta_i, \theta_s)$

$$\sigma_s(\theta_i, \theta_s) = A_1 \frac{\eta_0}{2\pi} \cos \theta_i, \quad (4.17)$$

bezogen auf eine Einheitsfläche A_1 von 1 m^2 . Die winkelabhängige Rückstreuung TS_u verändert sich dann mit $10 \log \cos \theta_i$

Fürs *Lambert'sche Gesetz* macht man die realistischere Annahme, dass die Streufunktion $G(\theta_i, \theta_s)$ nicht isotrop ist, sondern vom Streuwinkel abhängt. Die gestreute Intensität hängt dann von der Neigungsverteilung auf der Oberfläche ab. Nimmt man an, dass das Maximum bei senkrechtem Einfall ist und das Minimum bei parallelem Einfall, kann die ausgestrahlte durchschnittliche Energie als proportional zum Kosinus des Streuwinkels angenommen werden. Damit ergibt sich der Ausdruck

$$G(\theta_i, \theta_s) = \eta_0 \frac{\cos \theta_s}{\pi}, \quad (4.18)$$

der zum Streugrad führt

$$\sigma_s(\theta_i, \theta_s) = A_1 \frac{\eta_0}{\pi} \cos \theta_i \cos \theta_s, \quad (4.19)$$

und dieser zur Rückstreuung ($\theta_i = \theta_s$)

$$\sigma_{bs}(\theta_i) = A_1 \frac{\eta_0}{\pi} \cos^2 \theta_i. \quad (4.20)$$

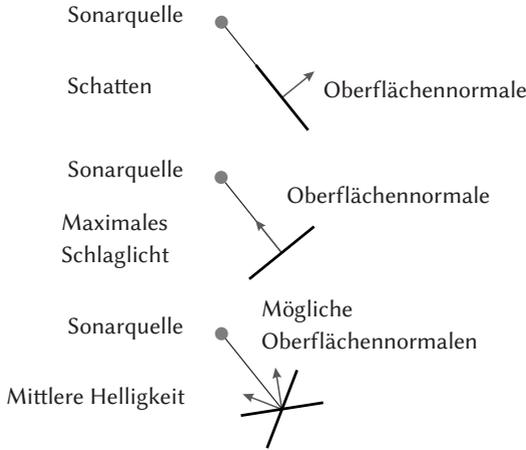


Abbildung 4.4: Für eine 1D-Konfiguration gibt es abseits der Rückstreu-Extrema unter Lambert’scher Annahme zwei Oberflächennormalen, die eine empfangene Intensität plausibel erklären. Abhängig vom Rückstreumodell kann es auch mehrere Konfigurationen geben.

Dies ist in logarithmischer Form als Zielmaß folgendermaßen darstellbar:

$$TS(\theta_i) = 10 \log \frac{\eta_0}{\pi} + 20 \log \cos \theta_i = TS_0 + 20 \log \cos \theta_i . \quad (4.21)$$

Das Zielmaß für eine perfekt reflektierende Oberfläche lässt sich so ermitteln: Die Oberfläche streut alle einfallende Energie in den Halbraum, transmittiert nichts in den Boden und führt dadurch zu $\eta_0 = 1$. In logarithmischer Notation korrespondiert das mit $TS_0 = 10 \log \frac{1}{\pi}$ was ungefähr -5 dB entspricht. In [Jen11] wird darauf hingewiesen, dass man diesen -5 dB Offset für TS_0 durch Messungen empirisch anpassen muss. Für unverdichtete Sedimente von Schlack bis grobem Sand seien -25 bis -35 dB gängig und -29 dB sei ein häufig gewählter Startpunkt für die Anpassung. Ein Beispiel für eine perfekt Lambert’sche Oberfläche, die von einem Kugelstrahler beleuchtet wird, ist in Abbildung 4.5 gegeben.

Unter der Annahme Lambert’scher Streuung lässt sich aus der Helligkeit nicht eindeutig ableiten, wie das Oberflächenelement orientiert ist. Selbst im eindimensionalen Fall sind zwei gleichwertige Orientierungen des Oberflächenelements möglich [Woo10b]. Dies ist in Abbildung 4.4 abgebildet.

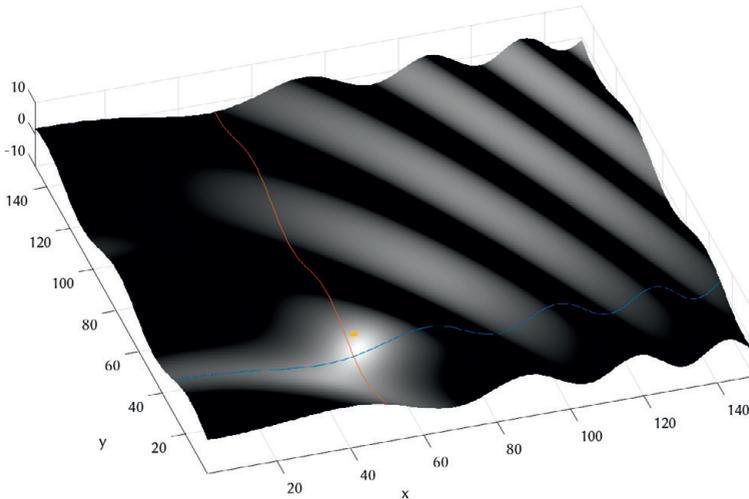


Abbildung 4.5: Optisches Beispiel zu Lambert'scher Streuung: Synthetische gewellte Oberfläche mit darüber positionierter Lichtquelle. Es findet kein Intensitätsabfall mit dem Abstand zur Lichtquelle statt, alle Oberflächenelemente werden nur entsprechend ihrer Neigung zur Lichtquelle schattiert. Der Lichtquelle abgewandte Oberflächenelemente sind schwarz.

Im Dreidimensionalen besteht die Mehrdeutigkeit dann aus allen derartigen Orientierungen eines Oberflächenelements, dass die resultierenden Normalenvektoren des Oberflächenelements einen Kegel aufspannen, der als Achse die Verbindungslinie zwischen Normalenaufpunkt und Sensor besitzt und zwischen Mantellinie und Achse den zur Rückstreuelligkeit gehörenden Winkel besitzt.

In [Jac07] ist der Verlauf des Rückstreumaßes über den Betrachtungswinkel für typische Situationen abgebildet und hat einen sehr ähnlichen Verlauf wie der Lambert'sche Fall, lediglich bei fast senkrecht einfallendem Schall (etwa $\pm 5^\circ$), trifft das voll diffuse Modell nicht zu. Dass das Lambert'sche Gesetz trotz seiner Einfachheit eine recht gute Annäherung an die Realität ist wird auch von Lurton [Lur10] und Bell et al. [Bel99] bekräftigt. Kraus [Kra13] bestätigt ebenso, dass das Lambert'sche Gesetz für Streifwinkel unter 60° eine genügend gute Näherung darstellt. Aus diesem Grund wird es in vielen Sonarsimulatoren verwendet [Pai10b]. Auch [Pet14] findet nur geringe Unterschiede zwischen hochauflösenden Bildern aktueller Hochfrequenz-

SAS-Sonarsensorik und Simulationen mit Lambert'scher Streuung. In den Arbeiten zur Rekonstruktion aus Sidescan-Daten von Durá et al. [Dur04] wird auf einige weitere Arbeiten verwiesen, die allesamt eine gute Übereinstimmung mit dem Lambert-Modell festgestellt haben. Auch für andere bildgebende Sonare wird bei Rekonstruktionsverfahren ein Lambert'sches Modell angenommen [Ayk13].

4.2.7 Weitere Oberflächenrückstreumodelle

In Nayar et al. [Nay91] ist eine ausführliche Diskussion über die Rückstreuung in der optischen Domäne gegeben. Voronovich [Vor99] gibt eine sehr umfassende Beschreibung mathematischer Modellierungen von Wellenstreuung an rauen Oberflächen. Die klassischen Modelle wie das Kirchhoff-/Facetten-Modell und die Bragg-Streuung/*small scale perturbation* werden hergeleitet und beschrieben. Darüber hinaus werden noch mächtigere Modelle wie *small slope approximation* vorgestellt.

Für die Beschreibung der Streuung in und um die Spiegelrichtung herum wird oft das Facettenmodell herangezogen [Lur10]. Die diffuse Komponente, die von der Rauheit der Oberfläche abhängt, wird durch Bragg-Scattering erklärt. Hier soll nur der Vollständigkeit halber auf die beiden Teilmodelle eingegangen werden, sie finden bei der in dieser Arbeit verwendeten Rückstreumodellierung derzeit keinen Niederschlag.

Diese Modellierungen werden nicht nur in der Sonardatenverarbeitung angewendet, sondern sind auch beim Radar gängig [Mas08]. Die folgende Beschreibung der Modelle orientiert sich vorwiegend an [Jac07; Lur10; Jac86].

4.2.7.1 Kirchhoff-Approximation und Facettenmodell

Die Kirchhoff-Näherung verlangt, dass die streuende Grenzschicht ziemlich glatt in dem Sinne ist, dass die Krümmungsradien nicht kleiner sein dürfen als die akustische Wellenlänge [Jac86]. Es wird bei einer Oberfläche von vollspiegelnder Reflexion der jeweils passend orientierten Oberflächenstücke ausgegangen. Damit ist die Rückstreuung in eine bestimmte Richtung durch die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Steigungen der Oberfläche gegeben [Jac07]. Die Oberflächenstücke sind verglichen zur Wellenlänge eben [Lur10], und werden als Facetten bezeichnet. Die Rückstreuung geschieht bei vorwiegend horizontalem Boden hauptsächlich senkrecht nach

oben, da viele Facetten dorthin zeigen. Da bei vorwiegend horizontalem Boden nur wenige Facetten woanders hin zeigen, fällt die Rückstreuung zu flacheren Winkeln hin stark ab. Diese Näherung sei besonders geeignet für die Modellierung der Streuung in der Nähe der spiegelnden Reflexionsrichtung [APL94]. Das Facettenmodell ist die Hochfrequenz-Näherung des Kirchhoff-Modells und ist eine frequenzunabhängige Beschreibung [Jac07]. Das bekanntere Torrance-Sparrow-Modell verwendet auch den Facettenansatz [Nay91].

4.2.7.2 Small-Scale-Perturbation

Diese Näherung ist zusätzlich noch unter vielen weiteren Bezeichnungen bekannt: Rayleigh-Rice-Näherung, Bragg-Streuung oder im Englischen *small roughness perturbation* sind gängige Bezeichnungen.

Die Näherung ist gültig für Reliefstandardabweichungen, die deutlich kleiner sind als die akustische Wellenlänge. Damit ist impliziert, dass diese feingranulare Oberfläche keinem strengen Potenzgesetz (wie in Abschnitt 7.7.5) folgen kann, das auf beliebig kleine Wellenzahlen ausgedehnt ist [Jac86].

Die Bezeichnung Bragg-Streuung des Rückstreumodells bedeutet hierbei nicht, dass die raue Oberfläche periodisch sein muss. Die Bragg-Streuung ist ja als Beugungseffekt an dreidimensionalen Gittern bekannt. Hier bedeutet die spezifische Bragg-Wellenzahl, dass vom gesamten Spektrum der Grenzflächenwellen, diejenigen mit der Bragg-Wellenzahl die Rückstreuung dominieren, sofern das Relief kleiner ist als die akustische Wellenlänge. Anders gesagt ist für einen bestimmten Beobachtungswinkel das Signal von denjenigen Beiträgen dominiert, die von Streuzentren kommen deren Echos in Phase sind [Jac86].

Streumodelle auf dieser Basis benötigen dazu das Rauheitsspektrum der Oberfläche, also die Fouriertransformierte der Reliefkovarianz [Jac07].

4.2.7.3 Composite-Roughness-Modelle – Jackson-Modell

Die *Composite-Roughness*-Modelle versuchen die Unzulänglichkeiten der normalen Kirchhoff- und Rayleigh-Rice-Näherungen auszugleichen, indem beide Modelle kombiniert werden und die Grenzfläche als Summe von zwei Typen von Oberflächenstücken modelliert wird, nämlich welchen mit relativ zur Wellenlänge großen Krümmungsradien und welchen mit relativ

zur Wellenlänge kleinen Strukturen [Jac86]. Viele der Ansätze verwenden für den Kirchhoff-Anteil das bereits genannte Facettenmodell als Hochfrequenznäherung und beinhalten Korrekturen für Abschattungseffekte der Facetten [Mul00].

Das bekannteste Modell dieser Kategorie dürfte das Jackson-Modell [Jac86; APL94] sein. Lurton [Lur10] bezeichnet es als sehr oft verwendet und zitiert. Es behebt die Frequenzunabhängigkeit des Facettenmodells und kombiniert zusätzlich noch Volumen-Rückstreuungseffekte.

4.2.7.4 Small-Slope-Approximation

Die *Small-Slope*-Modelle haben die *Composite-Roughness*-Modelle inzwischen weitgehend abgelöst. Sie bestehen aus einer einheitlichen Formulierung, die in jedem Bereich mindestens so genau ist wie die Modellierung durch die Kirchhoff-Näherung und das *Small-Scale-Perturbation*-Modell [Jac07].

4.2.7.5 SEARAY-Modell für hohe Frequenzen

Das Signal-zu-Rausch-Verhältnis wird im SEARAY-Modell unter Berücksichtigung von Richtcharakteristik, Absorption, Ausbreitungsverlust und verschiedenen Rauschquellen mit der Sonargleichung berechnet [Ett13]. Das SEARAY-Modell von Tuovila, sei laut Kraus [Kra13] für hohe Frequenzen $20\text{kHz} \leq f \leq 500\text{kHz}$ gedacht. Es unterscheidet bei der Rückstreusimulation vier verschiedene Sedimenttypen: Schlamm, Sand, Kies und Fels und basiert auf einem inkohärenten Raytracing-Modell [Bel95].

4.2.7.6 APL-UW-Modell

Das APL-UW-Modell [APL94] beschreibt ein physikalisch fundierteres Modell, bei dem das Spektrum der Oberflächenrauheit, die Schallgeschwindigkeiten und die Dichte des Sediments bekannt ist. Es berücksichtigt aber keine Scherkräfte im Meeresboden. Es ist eine Weiterentwicklung des Jackson-Modells, u. a. durch eine bessere Beschreibung der Absorption [APL94]. Es ist für Frequenzen von $1\text{kHz} \leq f \leq 500\text{kHz}$ gültig [Kra13].

4.2.7.7 NRL-Modell

Das NRL-Modell [Gau02] modelliert vieles noch detaillierter als das APL-UW-Modell, wird aber nur für Frequenzen von 10 Hz–10 kHz beschrieben. Es basiert auf physikalisch motivierten dreidimensionalen Modellen, die Einflüsse von unterschiedlichen Sedimenttypen auf die Streuung beschreiben. Es wird Wind beim Wasseroberflächenstreumodell berücksichtigt und Fischreflexionen werden für das Modell der Wassersäule beschrieben. Jensen et al. [Jen11] zeigt einen Vergleich des NRL-Modells und des APL-UW-Modells mit dem Lambert'schen Rückstreumodell über den gesamten Winkelbereich. Je feiner das Sediment ist, desto schlechter stimmt die Modellierung nach dem Lambert'schen Gesetz mit den anderen Modellen überein.

4.2.8 Sonargleichung

Die Sonargleichung entstand bereits während des zweiten Weltkriegs, um Reichweiten von Sonaren abschätzen zu können. Aber auch beim Design eines Sonarsystems können über die Anforderungen an das System Betriebsparameter berechnet werden und die Leistungsfähigkeit des Sonarsystems bestimmt werden. Sie beschreibt quantitativ ob das Signal eines Objekts ein genügend hohes *SNR* hat, um detektiert zu werden. Die Gleichungen berücksichtigen nicht jeden möglichen Einflussfaktor auf das Signal. Je nach Anwendungsgebiet müssen sie modifiziert oder erweitert werden. Sie sollen nicht dazu dienen, Berechnungen auf ein Zehntel-dB genau durchzuführen, weil durch die Einflüsse des Wassers (siehe Abschnitt 3.4.2) der Genauigkeit ohnehin Grenzen gesetzt sind [Uri83].

Die Notation der Sonargleichung wurde von Urick [Uri83] in den 1960er Jahren etabliert und setzte sich weitgehend gegen die ältere Notation von Horton durch. Hier werden in relativ sprechender Notation die Einflussgrößen genannt. Es werden die gängigen englischen Begriffe verwendet. Die Bezeichnungen sind auch in Abbildung 4.2 in Abschnitt 4.2.5 abgebildet. In tabellarischer Form sind sie in Tabelle 4.1 gelistet:

Es fallen die doppelten, nur durch Index unterschiedenen Benennungen auf, die absichtlich vergeben wurden, weil sie im Grunde identisches beschreiben.

Gerätebezogene Größen	
Projector Source Level	SL_p
Self-Noise Level	NL_s
Directivity Index	DI (siehe auch Abschnitt 8.3.3.5)
Detection Threshold	DT
Mediumbezogene Größen	
Transmission Loss	TL (siehe Gleichung (3.13))
Störungsbezogene Größen	
Reverberation Level	RL
Ambient Noise Level	NL_a
Zielbezogene Größen	
Target strength	TS (siehe Abschnitt 4.2.5)

Tabelle 4.1: Elemente der Sonargleichung. Sie werden jeweils in dB angegeben.

Die Klassische Sonargleichung von Urlick ist in Gleichung (4.22) gegeben:

$$SL_p - 2TL + TS - (NL_a - DI) =: DT. \tag{4.22}$$

Sie beschreibt die Aussendung eines Quellsignals einer bestimmten Intensität im Einheitsabstand (SL_p). Dies ist ein bauartbedingt vorgegebener und modellabhängiger Wert (siehe Abschnitt 6.3.3). Auf dem Weg zum Ziel und zurück schwächt sich das Signal ab ($-2TL$), im monostatischen Fall auf beiden Wegen identisch. Die Rückstreucharakteristik des Ziels in die Richtung des Empfängers definiert gewissermaßen die Sendeintensität des Ziels (TS). Das Umgebungsrauschen (NL_a) verschlechtert den Empfang, dem die Richtcharakteristik der Antenne (DI) entgegen wirkt. Das resultierende SNR ist die Detektionsschwelle (DT). Im bistatischen Fall schreibt man getrennt $-(TL_1 + TL_2)$ statt $-2TL$ für Hin- und Rückweg.

Meist wird die Gleichung umgestellt, dass die Echoerzeugung auf der einen und die Rauscheinflüsse auf der anderen Seite stehen:

$$SL_p - 2TL + TS = NL_a - DI + DT. \tag{4.23}$$

Handelt es sich nicht um Umgebungsrauschen, sondern um unerwünschte Echos (siehe Abschnitt 5.5) spricht man von *reverberation level* RL . In diesem Fall ist die Antennencharakteristik unwichtig (weil sie auch für die uner-

wünschten Echos gilt) und DT_R kennzeichnet dann die Detektionsschwelle unter diesen Bedingungen:

$$SL_p - 2TL + TS = RL + DT_R. \quad (4.24)$$

Die Gleichungen setzen sich für aktives und passives Sonar natürlich unterschiedlich zusammen, da in dieser Arbeit jedoch nur aktive Sonare verwendet werden, wird die Gleichung für Passivsonare hier nicht gezeigt. Je nach Autor finden sich in der Literatur leicht abgewandelte Formen der Gleichung. Allen gemein ist die einfache Struktur der Gleichung, die jeden Teilaspekt aufgrund der logarithmischen Betrachtung als Summand kapselt. Im Fall der Simulation ist die interessierende Größe der Schalldruckpegel DT am Empfänger.

4.3 Mehrwegeausbreitung

Im der Tiefsee spielt die Mehrwegeausbreitung eine untergeordnete Rolle [Ler09], insbesondere bei den geringen Distanzen, die für die Kartenerstellung durch ein AUV wichtig sind. Mehrwegeausbreitung sorgt auch dafür, dass die Kohärenz des Signals verloren geht [Pet14], was bei kohärent arbeitenden Aufnahmesystemen eine Signalverschlechterung bewirkt. In den hier vorliegenden Verfahren wurde die Mehrwegeausbreitung daher nicht berücksichtigt.

Störungen

Hier soll eine Übersicht über verschiedene Störeinflüsse bei der Sonardatenaufnahme durch ein Sidescan-Sonar gegeben werden. Der Schwerpunkt der Betrachtungen liegt auf dem Bereich oberhalb von ca. 100kHz, der von kartierenden Sidescan-Sonaren verwendet wird.

5.1 Umgebungsrauschen

Unter Umgebungsrauschen (engl. *ambient noise*) fallen Geräusche, die durch Wellen, Niederschlag, Wind, Tiere und durch Schiffsverkehr erzeugt werden. Zu Umgebungsrauschen wird aber auch akustische Interferenz von anderen Sonarsystemen gezählt.

Die auftretenden Frequenzen der natürlichen Phänomene liegen meist deutlich unterhalb des Arbeitsbereichs der hier betrachteten Sonare. Regen kommt mit 1–100kHz zwar nahe in diesen Bereich, die Schallenergie hat ihr Maximum jedoch bereits bei 15–20kHz [Lur10].

Andere Quellen, die nicht so hochfrequent sind, wie vielleicht zunächst erwartet wird, sind zerbrechendes Eis, das höchstens bis auf 5kHz kommt und Hagel mit nur 2–5kHz. Schnee hingegen wird unterschiedlich bewertet: [Lur10] spricht von ca. 35kHz, während [Cru99] sogar von 50–200kHz spricht. Dieser Frequenzbereich wird jedoch durch Untersuchungen in [Als09] nicht bestätigt.

Der akustische Einfluss von Wind wird in [Wil05] beschrieben: Wind sorgt für Wellen, die beim Brechen Luftbläschen ins Wasser einbringen und durch die mechanische Energie bei ihrer individuellen Resonanzfrequenz oszillieren. Die Überlagerung aller Einzelbläschen ergibt dann ein recht gleichverteiltes Rauschen mit einem sehr breiten Maximum bei einigen hundert Hertz. Sofern sich die Luft nicht im Wasser gelöst hat, steigen die Bläschen an die Oberfläche auf und agieren dabei als effektive Absorber und Streuer ihrer Resonanzfrequenz. Dieser Effekt ist so ausgeprägt, dass sehr starke Winde genauso leise sind wie eine Brise.

Sowohl in Lurton [Lur10] als auch in Jensen et al. [Jen11] und Urban [Urb02] wird ab ca. 10 kHz hauptsächlich thermisches Rauschen als Rauschquelle genannt. In Bereichen bis ca. 100 kHz könnten allenfalls Windgeräusche noch als weitere Störquelle betrachtet werden. Beispielsweise wird im Simulator von Pailhas [Pai10b] als Umgebungsrauschen nur thermisches Rauschen modelliert.

Da die genannten Schallquellen an der Wasseroberfläche Schall erzeugen und hochfrequenter Schall stark gedämpft wird, sind diese Schallquellen für ein hochfrequentes Sonarsystem in der Tiefsee wenig relevant.

Akustische Interferenz von anderen Systemen ist bei der derzeitigen Dichte von AUVs in der Tiefsee auch noch nicht zu berücksichtigen.

5.2 Eigengeräusch

Als weitere Störquellen gelten noch das Eigengeräusch, das eigenverursachte Rauschen des Trägerfahrzeugs (engl. *self noise*) durch Propeller, Motoren, Strömung und Turbulenzen. Zusätzlich kommen noch thermisches und elektrisches Rauschen hinzu [Lur10]. Dieses Rauschen spielt sich üblicherweise deutlich unterhalb von 10 kHz ab und ist daher für hochfrequente Sonare nicht gesondert zu berücksichtigen.

In den betrachteten Frequenzbereichen ist das thermische Rauschen vorherrschend und kann durch geeignetes Schaltungsdesign des Sonarsensors gering gehalten werden.

5.3 Biologisch erzeugtes Rauschen

Signale von Tieren sind in den höherfrequenten Bereichen sehr selten, lediglich einige Wal- und Delfinarten erzeugen Töne oberhalb von 100 kHz [Lur10]. Manche Delfinarten erreichen Schalldrücke von über 200 dB re 1 m re 1 μ Pa, während Wale bis zu ca. 180 dB re 1 m re 1 μ Pa erreichen [APL94]. Als sehr störend werden in warmen Gewässern Pistolenkrebse (engl. *snapping shrimps*) beschrieben. Die Tiere erzeugen zur Kommunikation und zum Jagen eine Kavitationsblase, wodurch ein stoßartiges, breitbandiges Signal entsteht [Fil14; Lur10; Kim10], das bis etwa 200 kHz reicht [Urb02]. Die Aufnahme eines hochfrequenten Sidescan-Sonars wird davon aber nicht

wesentlich beeinflusst. Da die Pistolenkrebse in flachen tropischen Gewässern vorkommen, spielen sie für die Betrachtungen in dieser Arbeit keine Rolle. Auch Störsignale von Meeressäugern werden als sehr selten gesehen und finden keinen Eingang in die Modellierung.

5.4 Rauschreduktion

Durch eine Antenne mit scharfer Richtcharakteristik (siehe Abschnitt 8.3.3.5) erhält man ein örtliches Filter, da Beiträge außerhalb des Öffnungswinkels sehr stark gedämpft werden. Eine zusätzliche Möglichkeit das Rauschen zu vermindern besteht darin, den Frequenzbereich des Sonars eng zu wählen, um nur für diesen Teil empfindlich zu sein und Rauscheinflüsse außerhalb davon auszublenden. Dies kann nicht nur über einen festen Frequenzbereich geschehen, sondern auch durch Pulsformen, wie sie in Abschnitt 8.3.3.4 ausgeführt sind.

5.5 Clutter

Obwohl das Echo beim Sidescan-Sonar das eigentliche Nutzsignal darstellt, sind Echos von unerwünschten Objekten (engl. *clutter*) ein Störsignal. In diesen Fällen bringen Methoden der Rauschreduktion (Abschnitt 5.4) nichts, da alle diese Verfahren auch dem Cluttersignal zugute kommen.

Daher seien in der Praxis ohnehin nicht die Rauschanteile das Problem, sondern der Clutteranteil [Pet14; Pai10b]. Ein Beispiel für *clutter* sind beispielsweise Sandwellen oder Felder mit Steinen, die für einen bestimmten Sensor aus einem bestimmten Blickwinkel wie Echos von interessierenden Zielen aussehen können [Pet14]. Diese sog. *unwanted targets* sind sehr schwer zu entfernen, und müssen in der Signalnachbearbeitung behandelt werden. Da der Einfluss ebenso störend ist wie bei Rauschen spricht man hier im Englischen auch von *reverberation noise*.

Vergleichsweise leicht geht die Entfernung von Signalen innerhalb der Wassersäule, z. B. die Signale eines Fischschwarms, da diese zeitlich noch vor der ersten Antwort des Bodens (engl. *first bottom return, FBR*) liegen. Unerwünschte Objekte, die sich selbst bewegen, können durch eine zweite Aufnahme derselben Stelle identifiziert werden. Durch diese Methoden

wird letztlich allerdings bereits eine modellbasierte Klassifikationsentscheidung getroffen.

5.6 Sonar als kohärentes Abbildungssystem

Da bei einem Sonarsystem eine kohärente Schallwelle zumindest in Teilen an einer in der Größenordnung der Wellenlänge rauen Oberfläche reflektiert wird, kommt es zu Speckle-Rauschen, bei dem durch Interferenzeffekte Flecken hoher und niedriger Intensität entstehen. Bei einer voll diffus streuenden Oberfläche ist das Specklemuster unabhängig von der Oberflächengeometrie und kann als Rauschprozess gesehen werden [Bea95]. Die Speckle-Problematik ist aus Anwendungen bei synthetischem Aperturradar bekannt [Mar12; Wes06].

Der Momentanwert eines schmalbandigen Signals, kann durch eine Gaußverteilung beschrieben werden [Lur10]. Überlagern sich die Echos vieler einzelner zufällig verteilter Streuzentren, kann gezeigt werden, dass die entstehende statistische Verteilung für die Phase eine Gleichverteilung ist. Für die Amplitude eines Schmalband-Rauschens erhält man die Rayleigh-Verteilung [Min02; Ain10; Lur10; Ric05; Bar97]:

$$f(a) = \frac{a}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{a^2}{2\sigma^2}\right). \quad (5.1)$$

Die resultierende Intensität des Speckle ist eine negative Exponentialverteilung d.h. eine χ^2 -Verteilung mit 2 Freiheitsgraden. Eine kurze Herleitung ist in Anhang C zu finden.

Speckle kann durch Verwendung von frequenzmodulierten Pulsen (siehe Abschnitt 8.3.3.4) vermindert werden [Rao93].

Pailhas et al. [Pai14b] zeigen, dass auch durch *Multiple-Input-Multiple-Output*-Antennen (MIMO-Antennen) Speckle-Rauschen reduziert werden kann. Insbesondere weisen die Autoren darauf hin, dass die durch destruktive Superposition entstandenen dunklen Stellen im Speckle-Muster dazu führen können, dass Detektionen nicht stattfinden, was für ATR-Fragestellungen schwerwiegend ist.

Für die Simulation von Sonardaten ist also das Speckle-Rauschen das einzige relevante Störsignal.

6.1 Warum nicht optische Sensorik?

Die Allgegenwart von Kamerasystemen lässt oft die berechtigte Frage aufkommen, inwieweit Kameras unter Wasser einsetzbar sind. Da die Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen (und damit Licht) unter Wasser sehr stark und frequenzabhängig gedämpft wird, reichen die Signale nicht sehr weit und es kommt zu Farbverschiebungen. Daher werden optische Sensoren unter Wasser praktisch ausschließlich im Nahbereich verwendet. Die Streuung an Schwebepartikeln (sog. *marine snow*) im Wasser verschlechtert die Aufnahmequalität noch weiter, insbesondere bei künstlicher Beleuchtung. Aktuelle optische Rekonstruktionsverfahren wie in Stephan und Beyerer [Ste14] können bei Unterwasser-Bildaufnahmen zumindest teilweise Verbesserungen bei den genannten Problemen herbeiführen.

6.1.1 Kameras und Lichtausbreitung

Passive Kameras können sinnvoll nur im Tiefenbereich des Epipelagials (bis ca. 200 Meter Tiefe) verwendet werden, da die Lichtintensität mit der Tiefe exponentiell durch Absorption abnimmt [Lal97]. Als Faustregel kann man von einer Zehntelung der Lichtintensität alle 100m ausgehen [Wil05]. Rotes Licht mit ca. 650 nm Wellenlänge wird schnell absorbiert, so dass nach 10 Metern sehr klarem Meerwasser trotzdem nur noch ungefähr 1% übrig ist. Blaues Licht mit ca. 450 nm Wellenlänge reicht am tiefsten mit 1% Restlicht nach ca. 150m in klarem Wasser. Dennoch sind manche Tiefseefische in der Lage, bei sehr klarem Wasser in den Tropen, Sonnenlicht noch in etwa 1000 Metern Wassertiefe wahrzunehmen bzw. Mondlicht bei noch etwa 600 Metern Wassertiefe. Dies entspricht Intensitäten von weniger als 10^{-15} W/cm^2 [Lal97]. Da blaues Licht an Partikeln stärker gestreut wird als rotes Licht, ändern sich die am tiefsten reichenden Wellenlängen in natürlichem Meerwasser mehr zum grün hin [Lal97].

Kameras, die eine aktive Beleuchtung tragen, betonen die Schwebepartikel aufgrund der Rückstreuung von diesen besonders und verschlechtern die Aufnahmequalität damit erheblich. Ein besonders in der Tiefsee wichtiger Aspekt einer aktiven Beleuchtung ist der hohe Energieverbrauch einer hellen Lichtquelle, da Tiefsee-AUVs durch lange Auf- und Abtauchzeiten ohnehin schon nur einen Teil ihres Energievorrats auf die eigentliche Mission verwenden können.

Erst bei Schallfrequenzen ab ca. 1 MHz ist die Absorption von Schall so hoch wie die Absorption von sichtbarem Licht in vollständig klarem Wasser [Wil05].

6.1.2 Gated viewing

Um die negativen Einflüsse von Schwebepartikeln bei der Kamerasicht unter Wasser abzumildern, wird versucht mit sog. *gated viewing* Abhilfe zu schaffen. Dabei handelt es sich um ein aktives Verfahren, bei dem nur Licht aufgenommen wird, das eine bestimmte Laufzeit absolviert hat und damit einen bestimmten Weg zurückgelegt hat. Dadurch können Schwebeteilchen in der Nähe der Kamera wirkungsvoll ausgeblendet werden, bzw. gezielt Aufnahmen eines bestimmten Entfernungsbereichs gemacht werden. Dafür werden Techniken gebraucht, die es erlauben die Belichtungszeit und -dauer des Kamerasensors extrem präzise einstellen zu können (im Nano- bis Picosekundenbereich). Eine Untersuchung zur Verwendbarkeit von Gated viewing unter Wasser ist in Andersson [And05] zu finden.

6.1.3 Laserscanner

Bei Vermessungsanwendungen in extremem Flachwasser (bis etwa 20–30 Meter) kommen bei ausreichender Klarheit des Wassers auch laserbasierte Messsysteme (Laserscanner, LIDAR¹⁰) zum Einsatz, da der Öffnungswinkel eines Multibeam-Sonars (Abschnitt 6.3.11) zu klein ist, um bei so geringen Tiefen große Flächen in akzeptabler Zeit zu kartieren. Dies geschieht dann entweder durch einen am Boot montierten Laserscanner (bei besonders klarem Wasser und kleinen Tiefen) oder durch Systeme aus der Luft, die mit einem Laserscanner arbeiten, der (im Gegensatz zu den in der Landrobotik üblichen Laserscannern) grünes Licht abstrahlt.

¹⁰ Analog zu Radar und Sonar: Light Detection and Ranging

6.2 Akustische Sensorik

Hier soll ein Überblick über die mannigfaltigen Ausprägungen an schallbasierter Unterwassersensorik gegeben werden. Allerdings ist es kaum möglich einen solchen Überblick erschöpfend darzulegen ohne den Rahmen der Arbeit zu überdehnen. Daher wird eine Auswahl relevanter und gängiger Typen von Sonarsystemen vorgestellt und der Aufnahmeprozess erläutert. Den Schwerpunkt der Betrachtungen bildet freilich das Sidescan-Sonar, dessen Daten durch die Verfahren in dieser Arbeit ausgewertet werden. Das Sidescan-Sonar wird im Deutschen auch als Seitensicht-Sonar bezeichnet. Da diese Bezeichnung aber weniger geläufig ist als der englische Begriff, wird hier der Begriff Sidescan-Sonar verwendet.

6.2.1 Aktives und passives Sonar

Sonare unterscheiden sich grundsätzlich dadurch, ob Schall ausgesendet und wieder empfangen wird (aktives Sonar), oder ob nur Schall empfangen wird (passives Sonar). Man nennt passive Sonare auch oft Hydrophone, um die Unterscheidung deutlicher hervorzuheben. Passive Sonare werden hauptsächlich in der Meeressäuger-Forschung und im militärischen Umfeld eingesetzt. Im Folgenden sind mit Sonaren immer aktive Sonare gemeint.

6.2.2 Bildgebende und profilbildende Sonarsensoren

Aktive Sonarsensoren werden darüber hinaus in zwei Klassen eingeteilt: Bildgebende und profilbildende Sonarsensoren, wobei sich die Beiträge dieser Arbeit ausschließlich mit der Datenverarbeitung bildgebender Sonare befassen. Von bildgebenden Sonaren spricht man, wenn die Echointensitätswerte über der Zeit ausgegeben werden, die zunächst einfach als Bild dargestellt werden und in der Vergangenheit hauptsächlich von Menschen interpretiert worden sind. Profilbildende Sonarsensoren geben hingegen Entfernungswerte aus, die einer geometrischen Auswertung unmittelbar zugänglich sind. Bildgebende Sonare sind z. B. das Sidescan-Sonar (Seitensicht-Sonar), das mechanisch rotierende Sonar und das vorwärtsschauende Sonar. Das Echolot sowie das Multibeam-Sonar (Fächerecholot) gehören hingegen zu den profilbildenden Sonaren.

Die erzeugten Daten werden bei bildgebenden Sonaren als Rückstreudaten (engl. *backscatter data*), bei profilbildenen als Bathymetriedaten (engl. *bathymetric data*) bezeichnet.

Moderne Sonare wie das interferometrische Sidescan-Sonar bzw. das interferometrische Synthetische-Apertur-Sonar sind gleichzeitig bildgebend und profilbildend. Bei Multibeam-Sonaren bekommt man zwar implizit für jeden Strahl auch einen Rückstreuwert, dies führt aber zu einem Rückstreubild von sehr geringer (aber für einige Anwendungen dennoch ausreichender) Auflösung. Bei manchen Multibeam-Sonaren gibt es Betriebsmodi, die zusätzlich Rückstreudaten liefern (mehr darüber in Abschnitt 6.3.11).

Die unterschiedlichen Sonartypen werden in Abschnitt 6.3 ausführlicher beschrieben.

6.2.3 Signalerzeugung

Die hier betrachteten bildgebenden Sonare arbeiten nach dem Impulsechoverfahren bei dem der Schallwandler (engl. *transducer*) unmittelbar nach Senden des Schallpulses auf Empfang umgeschaltet wird und Echosignale empfängt [Mül04].

Das aufgenommene Sonarsignal kann durch unterschiedliche physikalische Effekte erzeugt werden, wie es in Lerch et al. [Ler09] und Kuttruff [Kut06] ausgeführt ist: Meistens kommt der inverse piezoelektrische Effekt zum Einsatz. Durch die von den einfallenden Schallwellen verursachten Druckänderungen werden im piezoelektrischen Material des Wandlers Spannungsänderungen hervorgerufen, die gemessen werden. Es existieren auch Wandler auf Basis von Magnetostriktion, bei denen sich ein Magnetfeld ändert, sobald sich die Länge eines ferromagnetischen Stabes durch die Druckwelle ändert. Der inverse piezoelektrische Effekt verhält sich linear zur Druckänderung, beim magnetostriktiven Effekt verändert sich die Kraft mit dem Quadrat der magnetischen Flussdichte. Da in der Praxis lineares Verhalten bevorzugt ist, wird ähnlich der Polarisationsspannung beim elektrostatisch arbeitenden Mikrofon bei magnetostriktiven Systemen eine Vormagnetisierung durchgeführt. Die genannten Effekte sind reversibel und werden auch für den Sendevorgang verwendet.

Piezoelektrische Wandler stellen inzwischen 90% der künstlichen Schallquellen im Meer [Ros14]. Magnetostriktive Wandler kommen insbesondere bei der Erzeugung von Leistungsschall bis 50 kHz zum Einsatz [Mül04].

Elektrodynamische und elektrostatische Wandler existieren im Unterwasserbereich ebenso, haben aber nur wenig Bedeutung. Für Hydrophone werden aktuell auch Glasfasern verwendet, bei denen sich Länge und/oder Brechungsindex sich im Schallfeld messbar ändern [Ler09]. Moderne Faserhydrophone verwenden einen optischen Fabry-Pérot-Resonator mit in der Faser photolithographisch eingravierten Bragg-Gittern und messen die Änderung der Resonanzfrequenz [Mac15].

Ein Sonarsensor erzeugt also in der Regel zunächst Spannungswerte in linearer Entsprechung der Druckamplitude der einfallenden Wellen. Diese werden gleichgerichtet und ihr Effektivwert in Grauwerte umgesetzt und als Bild dargestellt. Verwendet das Sonar hingegen einen quadratischen Empfänger (engl. *square law receiver/detector*) werden die Amplitudenwerte quadriert. Im Radarbereich kommen laut Richards et al. [Ric10] inzwischen vorwiegend lineare Empfänger zum Einsatz, quadratische waren aber früher gängig [Too89]. Es ist nicht immer klar, welches Messprinzip im verwendeten Sensor zum Einsatz kommt. Vor der Datenauswertung muss geklärt sein, ob man es mit Druckwerten oder Intensitätswerten (mit den jeweils zugehörigen Messwertverteilungen) zu tun hat, was im Folgenden noch kurz vertieft wird.

Rauscheigenschaften

Wie schon in Abschnitt 5.6 beschrieben, überlagern sich bei der Sonaraufnahme viele Elementarwellen des gleichen schmalen Frequenzbandes, die von Punkten entlang einer zufällig rauen Oberfläche stammen. Dann besitzt das resultierende komplexe Feld durch den zentralen Grenzwertsatz im Grenzwert eine Gauß'sche Verteilung. Nimmt man an, dass Realteil und Imaginärteil unabhängig und unkorreliert sind, ist die Amplitude des resultierenden Feldes Rayleigh-verteilt [Min02; Lur10].

Barton [Bar97] beschreibt die Störungsverteilung (engl. *clutter distribution*, siehe auch Abschnitt 5.5) für Spannungen mittels Rayleigh- bzw. Rice-Verteilung und die Leistung mittels Exponential- oder Weibull-Verteilung (bei nicht einheitlichen großen Streuzentren). Bell [Bel95] nimmt für Daten von Sidescan-Sonaren ebenfalls eine Rayleigh-Statistik an, da außer für die spiegelnde Reflexionsrichtung die Rückstreuung von einer zufällig rauen Oberfläche herrührt und sich das Empfangssignal aus Elementarwellen der einzelnen Rückstreuzentren zusammensetzt. Diese Annahme kann sie in realen Messdaten auch statistisch nachweisen.

Die Parallelen in den Methoden der Signalverarbeitung zu Radar und medizinischen Anwendungen werden in [Ste01] aufgezeigt.

6.3 Gerätetypen und Aufnahmeprinzip

Bevor die Sonarsensorik vorgestellt wird, sollen noch Richtungsdefinitionen vorgestellt werden, die im Unterwasserbereich üblich sind.

6.3.1 Richtungsdefinitionen

Bei einem AUV nennt man die Fahrtrichtung *along track* und quer zur Fahrtrichtung *across track* (siehe Abbildung 6.1). Diese Begriffe werden im Folgenden ohne kursive Schriftauszeichnung verwendet.

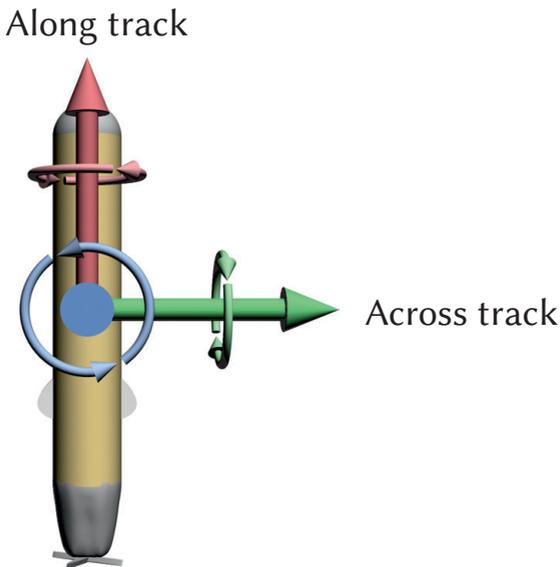


Abbildung 6.1: Richtungsdefinitionen bei einem AUV

Bezieht man sich auf die Strahlrichtung eines (meist schwenkbaren) Sonars, spricht man von *broadside*, wenn die Hauptkeule des Strahls genau senkrecht zur Sensorfläche ausgerichtet ist, bei paralleler Ausrichtung der Strahlkeule zur Sensorfläche spricht man von *endfire*. Dies ist in Abbildung 6.2 dargestellt.

Der Punkt senkrecht unterhalb des Fahrzeugs wird Nadir genannt. Ebenfalls gängig ist die Verwendung des Azimutwinkels φ_a zur Angabe von Richtungen vom Sensor ausgehend in einer Ebene parallel zur Bodenebene. Genauso wird der Elevationswinkel φ_e meist als Winkel in der Vertikalen benutzt, der zum Nadir hin gemessen wird und in der Ebene liegt, die von Nadir und Across-Track-Richtung aufgespannt wird.

In der Schifffahrt gelten ähnliche Bezeichnungen wie in der Land- und Luftrobotik was die Rotationen angeht: Trimmen, stampfen oder seltener nicken (engl. *pitch*) bezeichnet die Rotation um die eigene Querachse, rollen oder krängen (engl. *roll*) bezeichnet die Rotation um die Längsachse, und gieren (engl. *yaw*) die Rotation um die Hochachse. Die Vorwärtsbewegung heißt schnellen (engl. *surge*, *speed*), die laterale Seitwärtsbewegung versetzen oder driften (engl. *sway*) und die vertikale Auf-/Ab-Bewegung tauchen (engl. *heave*).

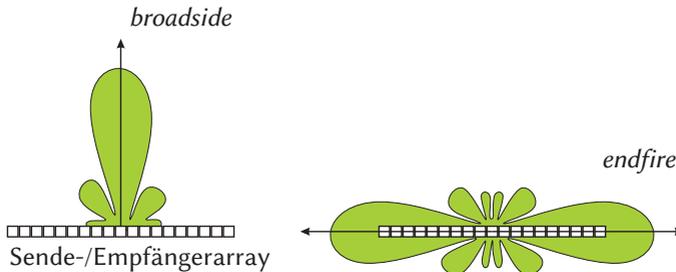


Abbildung 6.2: Schematische Antennencharakteristik für *broadside* (links) respektive *endfire* Konfiguration (rechts).

6.3.2 Vom Handlot zum Echolot

In früheren Zeiten hing man ein Seil mit einem Gewicht ins Wasser und maß anhand der regelmäßig im Seil angebrachten Markierungen wie Knoten oder Stoff-/Lederstücken die Tiefe. Dabei war auf der Unterseite des Gewichts oft noch eine Vertiefung eingearbeitet, in die Fett oder Talg eingebracht wurde um Bodenproben nehmen zu können. Bereits Herodot (479 v. Chr.) merkte aufgrund derartiger Beprobungen an, dass im Nildelta im Mittelmeer viel Schlick sei, der aus dem Nil kommen müsse. [Hof14].

Ein Echolot verwendet Laufzeiten von Schallsignalen zur Tiefenortung. Es sendet einen Schallpuls senkrecht nach unten aus und misst die Zeit, bis der Schallpuls wieder am Echolot eintrifft. Da die Schallgeschwindigkeit in Wasser zumindest näherungsweise bekannt ist, kann daraus ein Abstands- bzw. Tiefenwert berechnet werden.

Nach dem Titanic-Unfall 1912 wurde diese Idee durch mehrere Forscher parallel entwickelt, jedoch wird Alexander Behm als Erfinder genannt, der 1913 das zugehörige Patent angemeldet hat [Neu25]. Den Aussendevorgang des Pulses nennt man »Ping« bzw. »pingen«, auch wenn man bei modernen Geräten nicht mehr unbedingt Schall im hörbaren Bereich sendet. Das Echolot ist also ein profilbildendes Sonar mit einem Messpunkt pro Ping.

6.3.3 Sidescan-Sonar

Nicht viel komplizierter aufgebaut als das Echolot ist das Sidescan-Sonar, das laut [Fle12] 1958 von Dr. Julius Hagemann in einem Patent veröffentlicht wurde. Es handelt sich um ein bildgebendes Sonar.

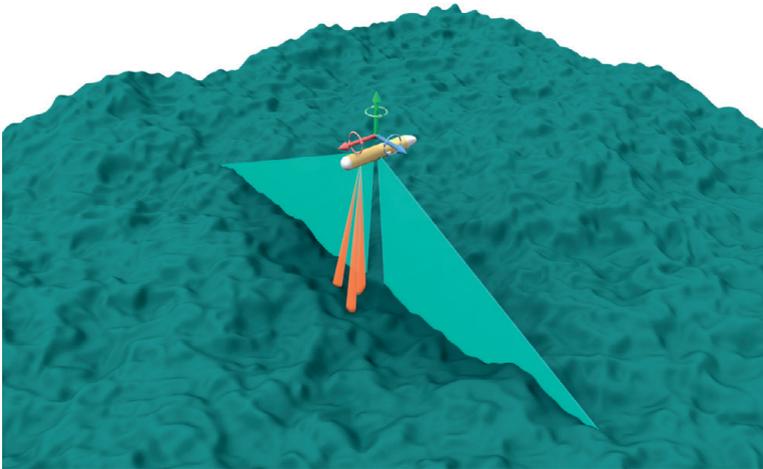


Abbildung 6.3: Schemazeichnung eines Unterwasserfahrzeugs mit Sidescan-Sonar (türkis) und Doppler Velocity Log (DVL, orange), sowie einer Inertialmesseinheit (Pfeile in rot, grün und blau). Die Sidescan-Daten werden senkrecht zur Fahrtrichtung erhoben. Direkt unterhalb des Fahrzeugs ist die Nadirlücke *nadir gap* des Sidescan-Sonars zu sehen.

Beim Sidescan-Sonar wird von einem Wandler ein Schallpuls seitlich exakt senkrecht zur Fahrtrichtung¹¹ abgestrahlt und die Echointensität über der Zeit aufgezeichnet. Das ist in Abbildungen 6.3 und 6.5 schematisch dargestellt. Es interessiert also nicht nur das erste zurückgeworfene Echo, sondern die gesamte Ausprägung des Echos über der Zeit. Der Schallwandler ist so konstruiert, dass ein stark gerichteter Stahl abgestrahlt wird (siehe Abschnitt 6.3.3.5). Die Strahlbreite ist im Azimutwinkel schmal (z. B. 1°), vom Elevationswinkel her aber recht breit (z. B. 50°). In dieser Arbeit wird immer davon ausgegangen, dass der Strahl genau nach *broadside* gerichtet ist.

Die maximale Reichweite des Sonars (engl. *range*) hängt von der frequenzabhängigen Dämpfung der Sonarsignale (Abschnitt 3.4), der Empfindlichkeit des Empfängers und der gewünschten Wiederholrate ab. Mit der Schallgeschwindigkeit lässt sich die Wiederholrate aus der Sichtweite als *two-way travel time* berechnen. Nach dieser Maximallaufzeit wird ein neuer Puls ausgesendet. Pulse zeitlich zu überlagern um die Wiederholrate zu erhöhen geht in der üblichen Konfiguration eines Sidescan-Sonars nicht, da es nur einen Schallwandler für das Empfangen und Senden gibt. Gäbe es reine Empfangswandler könnte man die Wiederholrate beispielsweise durch codierte Pulse (Abschnitt 8.3.3.4) erhöhen.

Üblicherweise wird ein Gefährt mit zwei Schallwandlern ausgestattet (je einer Backbord und Steuerbord) um eine größere Flächenleistung zu erreichen. Die Sonare senden ihre Pulse synchron, um ein Übersprechen (engl. *crossstalk*) zu vermeiden. Früher wurden Sidescan-Sonare ausschließlich hinter einem Trägerschiff in Form eines geflügelten Torpedos als sog. Schleppfisch (engl. *tow fish* oder (*deep-*)*towed sonar*) an einem Seil geschleppt, was auch heute noch gängig ist. Durch die Flügel wurde einerseits eine Rollstabilisierung erreicht, andererseits der nötige Abtrieb erzeugt, so dass der Schleppfisch deutlich unterhalb der Oberfläche und damit von Strömungen des Trägerschiffs unbeeinflusst bleibt. Heute werden Sidescan-Sonare nicht mehr nur geschleppt, sondern auch in Unterwasserfahrzeuge direkt eingebaut. Im Vergleich zu einem an einem AUV angebrachten Sonar sind die Eigenbewegungen, die der Schleppfisch vollführt, in der Regel stärker.

¹¹ Manche modernen Sidescan-Sonare sind Array-basiert und können den Strahl auch elektronisch schwenken.

Früher wurden die Sonarsignale eines Sidescan-Sonars auf Thermopapier aufgezeichnet. Wenn der analoge Thermograph aus den Sonarschatten kein Echo erhalten hat, blieb das Thermopapier weiß. Helle Bereiche bezeichneten demnach kein Echo, dunkle Bereiche ein starkes Echo. Damit Schatten aber wie gewohnt schwarz sind, wird heute meistens die invertierte Darstellung gewählt [Blo09]. In dieser Arbeit folgen wir der neueren Konvention, bei der Schattenbereiche schwarz dargestellt sind. Typische Sendeschallpegel eines Sidescan-Sonars betragen üblicherweise zwischen 200 dB und 230 dB, typisch ist z. B. 225 dB re $(\mu\text{Pa})^2\text{m}^2$ [Ain10]. Ein Sidescan-Sonar ist nur an der Amplitude des ankommenden Signals interessiert und wertet die Phase nicht aus.

Sidescan-Sonare werden kommerziell zur Wrackinspektion oder bei Kabelverlegearbeiten verwendet. Generell ist die Erkennung kleiner Objekte durch die höhere Auflösung eine Domäne, in der Sidescan-Sonare den Vorzug vor Multibeam-Sonaren bekommen. Auch zur Bestimmung des Sedimenttyps werden Sidescan-Daten herangezogen.

Ein Beispielbild, zusammengesetzt aus 1000 Zeilen einer Flachwasser-Sidescan-Sonar-Aufnahme ist in Abbildung 6.4 dargestellt.

6.3.3.1 Schrägentfernung und Horizontalentfernung

Betrachtet man einen Sonarpuls, dessen Echo über der Zeit aufgezeichnet wird, kann man sich die zeitlichen Signalabtastpunkte (engl. *samples*) als entlang der gedachten Ausbreitungslinie aufgetragen vorstellen. Da diese geneigt ist, spricht man von Schrägentfernung (engl. *slant range*). Dies ist in Abbildung 6.5 illustriert. Der Abstand vom Nadir zu einem Bodenpunkt wird entsprechend Horizontalentfernung (engl. *ground range*) genannt. Diese beiden Begriffe existieren im Deutschen zwar, sind jedoch unüblich, weswegen im Folgenden die englischen Begriffe verwendet werden. Unter der Annahme eines ebenen Meeresbodens und isotroper Schallausbreitung, d. h. wenn für jeden Sonar-Samplewert genau ein Oberflächenelement verantwortlich ist, kann aus den Intensitätsdaten in Slant-Range-Koordinaten ein eindeutiges Ground-Range Bild erzeugt werden. Dies ist in Abbildung 6.6 dargestellt und wird durch folgende Formel beschrieben:

$$r_g := \sqrt{r_s^2 - h_{\text{AUV}}^2}, \quad (6.1)$$

$$\text{mit } r_s := \frac{c \cdot t}{2}. \quad (6.2)$$

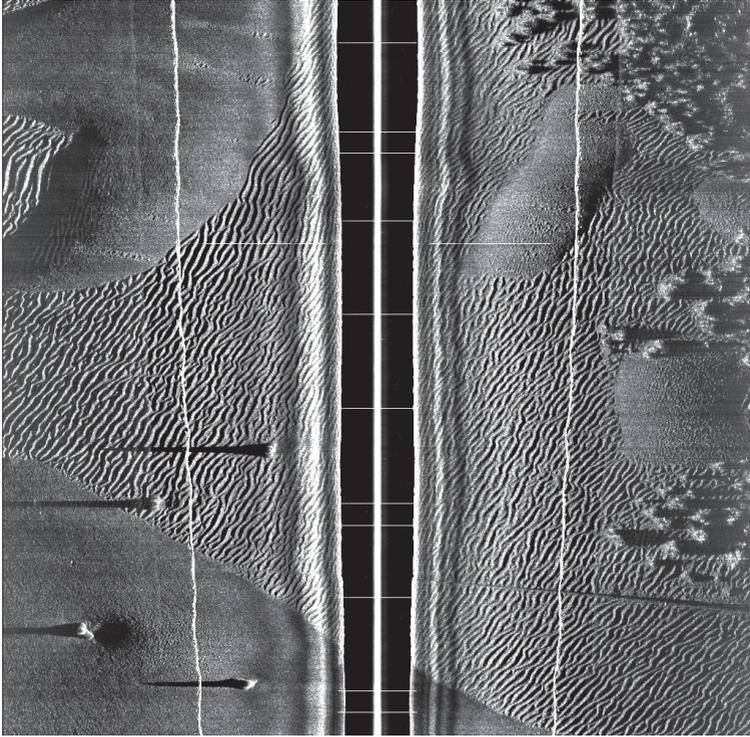


Abbildung 6.4: Beispielbild eines MarineSonic Sidescan-Sonars. Gut erkennbar sind verschiedene Terraintypen wie Sandwellen, ebenes Terrain und Fels. Der Sonar-Schattenwurf von Objektion ist gut zu erkennen. Die hellen nahezu vertikalen Linien sind die Reflexion der Wasseroberfläche, da es sich um Flachwasseraufnahmen handelt. Nahe des Nadir sieht man die Einflüsse der Antennencharakteristik. Bild wiedergegeben mit freundlicher Genehmigung von Yan Pailhas.

In der Praxis muss für die Ground-Range-Daten insbesondere im Bereich des Nadir zwischen den Samples interpoliert werden, da die Abtastung in Slant Range regelmäßig erfolgt und die Nichtlinearität der Abbildung aus Gleichung (6.2) hier am größten ist.

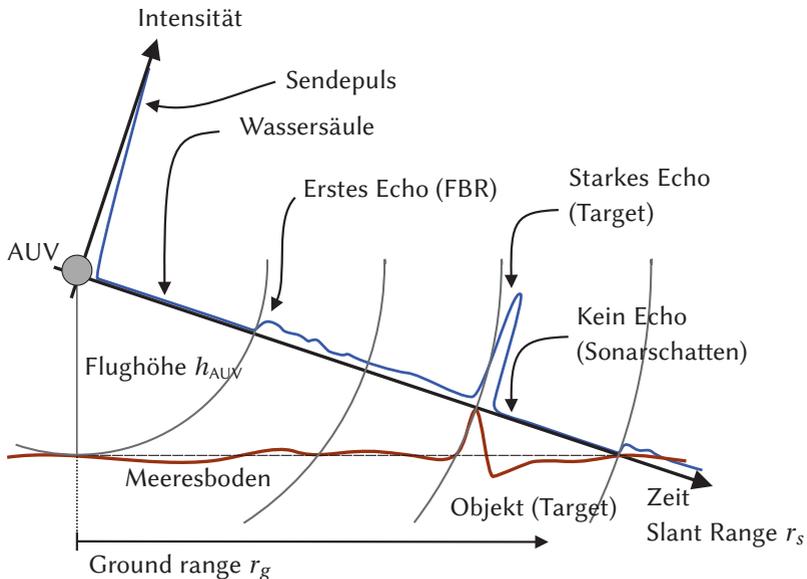


Abbildung 6.5: Sonar-Amplitudenverlauf in Slant-Range-Koordinaten (blau) zusammen mit dem korrespondierenden Ground-Range Relief (braun).

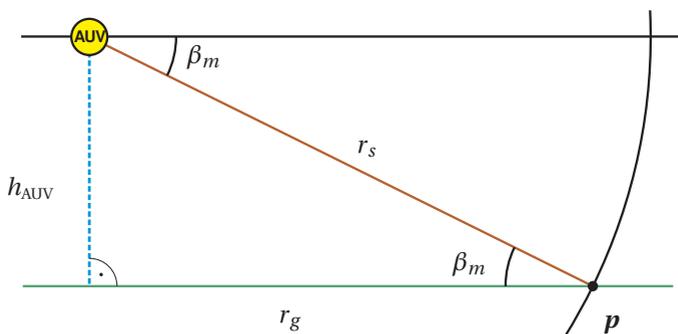


Abbildung 6.6: Umrechnung von Slant-Range nach Ground-Range Koordinaten

6.3.3.2 First bottom return

Um die Daten für die Ground-Range-Entzerrung verwenden zu können, muss das erste Bodenecho bekannt sein. Diese erste Echoantwort vom Untergrund bezeichnet man als *first bottom return* (FBR).

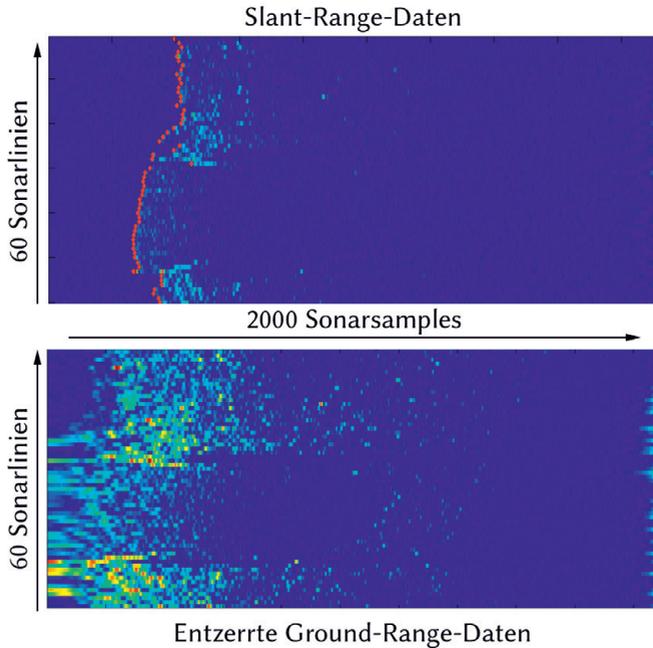


Abbildung 6.7: *Oben:* Erkennung des FBR für jede Zeile (rot). *Unten:* Entzerrte Sonardaten nach Erkennung des FBR mit linearer Interpolation.

Die Erkennung des FBR auf realen Sonardaten ist in Abbildung 6.7 dargestellt und erfolgte nach folgender Vorgehensweise: Zuerst erfolgt eine Medianfilterung der Sonarlinie, dann werden Mittelwert und Varianz über einen Bereich von 2,5%–97,5% der Sonarlinie gebildet. Damit sind Artefakte an den Rändern von der Statistik ausgenommen. Der FBR wird mit folgender Heuristik gefunden: Als FBR wird diejenige Stelle definiert, an der zeitlich zuerst zwei direkt aufeinanderfolgende Sonarsamples mehr als $1,7\sigma$ vom Mittelwert der Linie abweichen. Die Parameter wurden empirisch bestimmt.

In den meisten Fällen kommt dieses Echo vom Nadir, aber nicht zwangsläufig [Woo11b]. Das ist in Abbildung 6.8 dargestellt. Ist der FBR erkannt, kann man die Daten in Ground-Range-Koordinaten entzerren (Abbildung 6.7 unten).

Die Erkennung des FBR ließe sich zusätzlich auch über die Zeit filtern, etwa mittels eines Kalmanfilters. Das ist geeignet, wenn man eine Modellannahme über den Verlauf des Meeresbodens machen möchte.

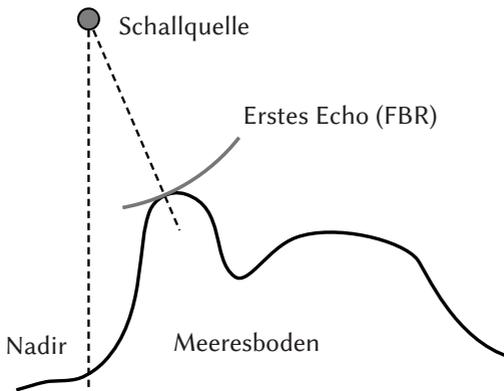


Abbildung 6.8: Das erste Echo (FBR) muss nicht unbedingt aus dem Nadir kommen, wird aber in den meisten Fällen der Einfachheit halber angenommen. In der Praxis sind die Abweichungen vom Nadir tatsächlich eher gering.

6.3.3.3 Auflösung eines Sidescan-Sonars

Während die Auflösung across-track von der Zeitauflösung des Aufnahmesystems und der gesendeten Pulslänge abhängt, ist die Auflösung in Fahrtrichtung abhängig von der horizontalen Strahlbreite, der Pulswiederholrate und der Fahrgeschwindigkeit. Das heißt, die gewonnenen Daten sind in der Regel anamorph.

Bei gegebener zeitlicher Auflösung verschlechtert sich die relative Auflösung across-track je näher man dem Nadir kommt. Dies ist in 6.9 verdeutlicht und ist der Aufnahmegeometrie inhärent, da die Wellenfront im Nadir tangential auf den Meeresboden auftrifft. Wie die Auflösung von der Pulslänge abhängt wird später in Abschnitt 8.3.3.4 erläutert. Bell [Bel95] nennt exemplarisch, dass hochfrequente Sidescan-Sonare bei 500 kHz mit einer

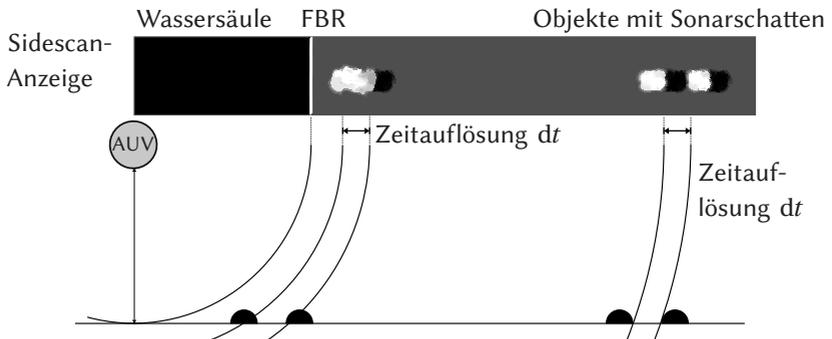


Abbildung 6.9: Schematische Darstellung der Änderung der Auflösung in across-track Richtung mit dem Abstand zum Sonar. Die beiden Objekte haben jeweils denselben Abstand am Boden.

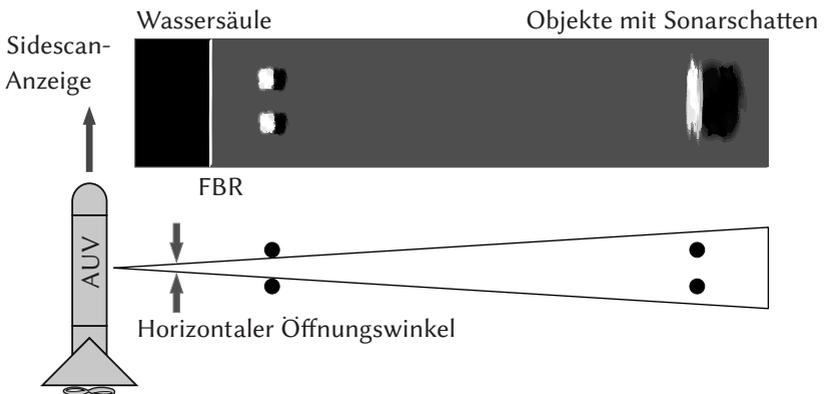


Abbildung 6.10: Schematische Darstellung der Änderung der Auflösung in along-track Richtung mit dem Abstand zum Sonar. Auch hier haben die beiden Objekte jeweils denselben Abstand am Boden.

typischen Pulslänge von 0.01 ms eine zehnmal höhere Auflösung besitzen als mittelfrequente 100kHz-Systeme mit Pulslängen von 0.1 ms. Die Auflösung des Sidescan-Sonars along-track ist durch die Strahlaufweitung abhängig vom Abstand zum Sensor und ist schematisch in Abbildung 6.10 abgebildet. Objekte in größerer Entfernung können durch den aufgeweiteten Strahl nicht mehr unterschieden werden. Eine Formel für die Auflösung

des aufgeweiteten Strahls wird später bei den Rekonstruktionsverfahren in Abschnitt 9.4.3.14 gegeben [Woo15a].

6.3.3.4 Foreshortening und Layover

Die in Abschnitt 6.3.3.1 gezeigte nichtlineare Verzerrung wirkt sich am stärksten nahe des Nadir aus und wird auch als *foreshortening* bezeichnet, da der Bereich in den Sonardaten verkürzte Darstellung erfolgt (siehe Abbildung 6.11).

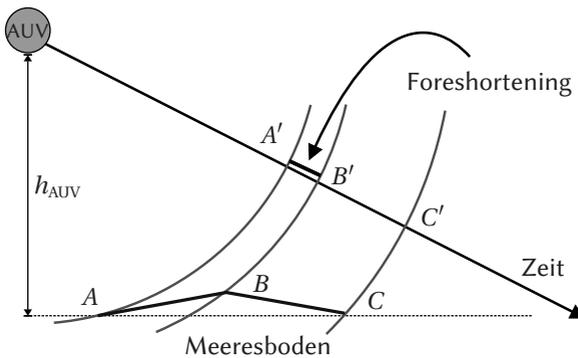


Abbildung 6.11: Foreshortening

Layover ist ein Extremfall des Foreshortening und tritt auf, wenn der Meeresboden steiler aufragt als die Tangente an die Ausbreitungswelle (z.B. Kugelwelle bei isotroper Ausbreitung). Dann kommen die Echos nicht in monotoner Abhängigkeit von der *ground range*, sondern in einer anderen Reihenfolge am Sensor an. Dieser Sachverhalt ist in Abbildungen 6.12 und 6.13 schematisch dargestellt. In Abbildung 6.13 wurde schematisch dargestellt, welche Oberflächenbereiche bei einer dreidimensionalen Darstellung gleichzeitig zum Echo beitragen. Der Grenzfall dient in Abschnitt 9.4.1 zur Betrachtung der Grenzen einer Rekonstruktion.

6.3.3.5 Antennenrichtcharakteristik eines Sidescan-Sonars

Der Schall eines Sidescan-Sonars soll einen großen Winkelbereich in der Elevationsrichtung beschallen, um den überfahrenen Bereich großflächig abzudecken. Typischerweise werden bei realen Systemen Öffnungswinkel

zwischen 40 und 60 Grad erreicht. Das Sonar ist vom Einbau her üblicherweise so ausgerichtet, dass der beschallte Bereich nicht direkt am Nadir beginnt, sondern ein kleines Stück weiter außen, um bei Rollbewegungen des Fahrzeugs nicht sofort Artefakte zu erzeugen (siehe Abschnitt 9.1.3). Die genaue Ausrichtung ist von Modell zu Modell unterschiedlich.

Der Öffnungswinkel in along-track Richtung wird möglichst gering gehalten um eine gute Trennschärfe der Einzelaufnahmen zu erzielen. Dadurch überlappen sich die abgetasteten Bereiche verschiedener Pings möglichst wenig. Typische Sonare erreichen Öffnungswinkel von $0,2^\circ$ bis 2° . Mit dem Öffnungswinkel meint man bei Sonaren üblicherweise den Winkel zwischen den sog. *half power points*, in logarithmischer Darstellung also zwischen den -3 dB-Punkten¹², was ungefähr dem Wert $0,89 \lambda/l_x$ entspricht. Dabei ist die Länge des Sonarwandlers (Bug-Heck) mit l_x und die Wellenlänge mit λ angeben.

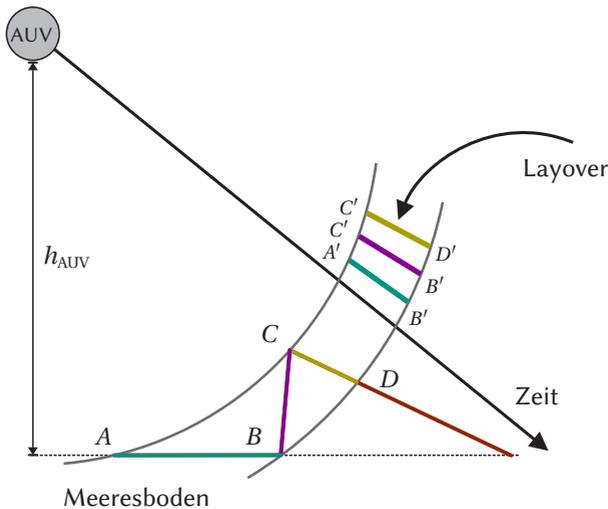


Abbildung 6.12: Layover-Effekt. Die Strecke \overline{BC} wird vom Sonar nicht von B nach C beschallt, sondern andersherum. Die Echos der Strecken \overline{CB} und \overline{CD} überlagern sich.

¹² Streng genommen sind diese Punkte bei $10 \log_{10}(1/2) \approx -3.0103$ dB, aber es wird meist mit dem runden Wert gerechnet.

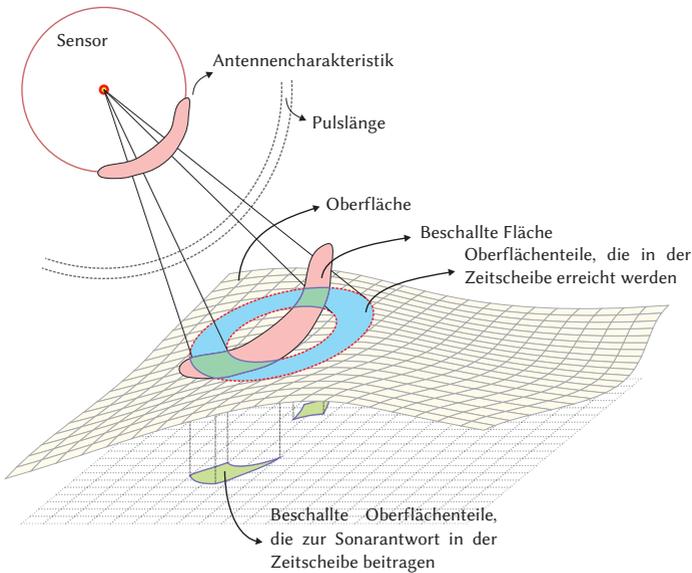


Abbildung 6.13: Illustration des Layover-Effekts in 3D. Gezeigt ist die schematische Darstellung eines isotropen Pulses, der durch die Antennencharakteristik gewichtet auf die Oberfläche trifft.

Elektronisch erzeugte Strahlformen

Moderne Sidescan-Sonare erzeugen den scharfen Sonarstrahl nicht durch einen einzigen Transducer sondern bestehen aus mehreren Empfangstransducern und berechnen aus den Antworten der einzelnen Transducer einen Strahl mit schmalere Öffnungswinkel (engl. *beamforming*). Dieser Strahl kann bei der Berechnung in gewissen Grenzen ausgerichtet werden (engl. *steering*). Dies hat den Vorteil, dass Beambreiten erreichbar sind, die mit vollflächigen Transducern mechanisch nicht erreichbar sind. Zudem kann ein elektronisch gesteuerter Strahl, der nicht fest nach *broadside* gerichtet ist, die Fahrzeugbewegung teilweise ausgleichen (sofern der Auswertelektronik des Sidescan-Sonars diese Information weitergegeben wird). Allerdings ist das bei der Bewegungsstabilität eines AUV während der kurzen Zeit eines Pings nicht unbedingt notwendig. In dieser Arbeit wird der Fall eines einfachen Sidescan-Sonars betrachtet, dessen Hauptkeule immer senkrecht zum Transducer (exakt nach *broadside*) ausgerichtet ist und durch ein Wandlerelement mit

Rechteckmembran erzeugt wird. Mehr Details zur verwendeten Antennencharakteristik werden in Abschnitt 8.3.3.5 erklärt.

6.3.3.6 TVG

Die zeitabhängige Verstärkung (engl. *Time-varying gain*, TVG), manchmal auch *Time Gain Compensation* (TGC) ist eine across-track Korrektur, die den Ausbreitungsverlust ausgleichen soll und üblicherweise vom Sonarsensor direkt bei der Aufnahme gemacht wird. Ist sie unbekannt, kann sie auch empirisch bestimmt werden, indem identische Probenkörper vermessen werden [Blo09]. Dies ist jedoch aufwendig. Üblicherweise wird für kugelförmige Schallabstrahlung zum Objekt und vom Objekt zurück bei konstant angenommener Schallgeschwindigkeit korrigiert, was einer Korrektur von $40 \log r + ar$ entspricht (siehe auch Abschnitt 3.4.1). Manchmal wird auch die mit kleinerem Streifwinkel (bei größeren Entfernungen) schwächere winkelabhängige Rückstreuung mit ins TVG integriert [Bel95].

Effekte von verschiedenen Arten von TVGs werden in Elston et al. [Els04] untersucht. Dort wird gezeigt, dass bereits leicht andere TVG-Funktionen, deren unterschiedlicher Effekt fürs Auge nicht sichtbar ist, die Statistik der Intensitätsverteilung ändern können.

6.3.3.7 Sidescan-Sonar-Mission

Bei einem typischer Sidescan-Einsatz über einem Missionsgebiet werden normalerweise mehrere Sichten aus unterschiedlichen Blickpunkten auf dasselbe Gebiet gewonnen [Ree06]. Gängig sind etwa ein überlappendes und gekreuztes sog. Rasenmähermuster (engl. *lawn mower pattern*), wie es in Abbildung 6.14 schematisch dargestellt ist. Dabei handelt es sich um parallele Bahnen, bei denen sich die Bahnen so überlappen, dass die Lücke, die im Nadir des Fahrzeugs durch die Strahlform und die Einbauneigung des Sonars auftritt (engl. *nadir gap*) von der Nachbarbahn gefüllt werden (engl. *gap filling*). Im Anschluss wird das Gebiet mit einem weiteren um 90 Grad gedrehten Rasenmähermuster überfahren oder zumindest nochmals durch einige wenige Bahnen senkrecht gekreuzt. Je nach Ziel der Mission werden auch Zickzack-Muster oder Achten im Kreis (engl. *rotating eight*) gefahren.

6.3.3.8 Mehrfrequenz-Sidescan-Sonar

Eine höhere Frequenz sorgt beim Sidescan-Sonar für eine höhere Auflösung. Durch die stärkere Dämpfung hoher Frequenzen im Wasser, geht mit einer Frequenzerhöhung aber auch eine Verringerung der Reichweite einher (Abschnitt 3.4.2.1). Je nach Missionstyp wird vorab ein Sonargerät mit geeigneter Frequenz ausgewählt.

Um flexibel auf unerwartete Situationen reagieren zu können, kann es sinnvoll sein z. B. eine höhere Frequenz für eine detailliertere Betrachtung zu verwenden. Manche Sidescan-Sonare besitzen für diesen Zweck mehrere Transducer für unterschiedliche Frequenzen und erlauben damit einen Frequenzwechsel während der Mission.

6.3.3.9 Typische Frequenzen für Sidescan-Sonare

Um eine Vorstellung zu geben, welche Frequenzen bei Sidescan-Sonaren auf AUVs typischerweise verwendet werden, kann man als Richtwerte Folgendes angeben: Für die Erstellung von Übersichtskarten ca. 50-100kHz (Wellenlänge 3 - 1,5 cm), für Karten, auf denen Objekte detektiert werden sollen 200-400 kHz (Wellenlänge 0,75 - 0,375 cm) und für Inspektion im Nahbereich sowie Klassifikationsaufgaben 1 MHz (Wellenlänge 0,15 cm) und höher.

6.3.4 Multi-Beam/Multi-Angle Sidescan-Sonar

Beim *multi-beam/multi-aspect* Sidescan-Sonar (MBMA) wird ein Gebiet in einem weiten Öffnungswinkel (sowohl in Elevationsrichtung als auch in Azimutrichtung) beschallt, der Empfang erfolgt jedoch durch geschwenkte Empfangsstrahlen mit engem Azimutwinkel [Hoe10]. Das macht die Verwendung von Empfängerarrays notwendig. Alternativ können auch die Sendewandler eine gerichtete Charakteristik und ein eigenes Frequenzband haben und der Empfänger einen großen Öffnungswinkel und eine Bandbreite, die alle Sendesignale umfasst. Mit dieser Technik wird ein größeres Gebiet bei jeder Sonaraufnahme erfasst [Zer09]. Durch diese Sensorkonfiguration werden pro Ping mehrere Sidescan-Aufnahmen in mehreren Azimutrichtungen gewonnen. Es existiert auch in einer interferometrischen Variante als *Multi-angle Swath Bathymetry Sidescan* (MSBS).

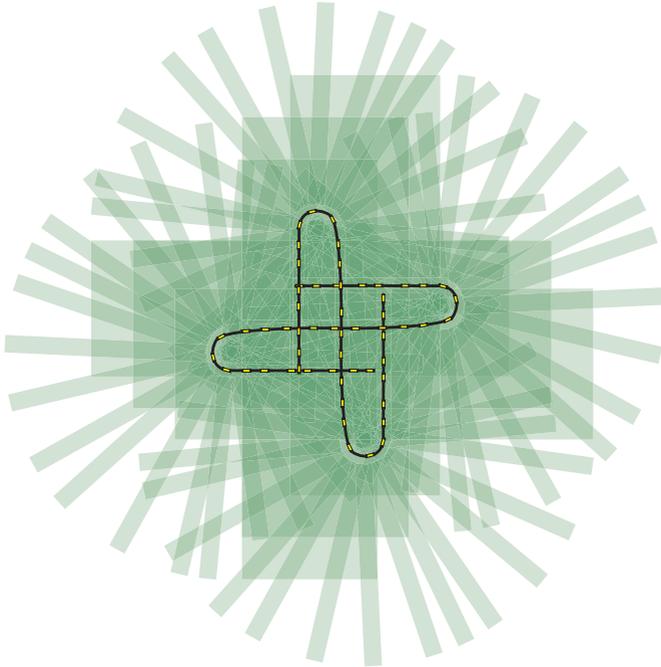


Abbildung 6.14: Schemazeichnung einer Sidescan-Aufnahme aus der Vogelperspektive nach einem Rasenmähermuster: Parallel verlaufende Bahnen und im Anschluss das gleiche Muster um 90 Grad gedreht. Die grünen Flächen geben die bei jeder Messung beobachteten Flächen an. Je dunkler das grün, desto häufiger wurde der Flächenteil beobachtet (engl. *coverage*). Der Einfachheit halber wurden beide Teiltrajektorien nicht verbunden.

6.3.5 Mechanically Scanning Imaging Sonar

Beim mechanisch rotierenden Sonar (engl. *Mechanically Scanning Imaging Sonar, MSIS*) handelt es sich um ein bildgebendes Sonar, bei dem ein Sonar-Sensorkopf langsam um seine eigene Achse rotiert und z. B. 6–15 s Sekunden pro Umdrehung benötigt, abhängig vom Modell und der gewählten Entfernungseinstellung [Rib08]. Ein Schallpuls wird ausgesendet und das Echo über der Zeit wird in ein Polarkoordinatensystem eingetragen. Das Messprinzip ist also ähnlich wie beim Sidescan-Sonar, nur dass die Messungen häufiger geschehen und damit weniger Reichweite haben. Durch die

langsame Aufnahmegeschwindigkeit für eine volle Umdrehung ist das MSIS empfindlich gegenüber Fahrzeugeigenbewegung. Der Aufnahmeprozess ist schematisch in Abbildung 6.15 dargestellt.

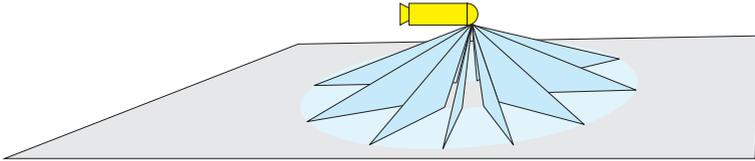


Abbildung 6.15: Schemazeichnung eines mechanisch rotierenden Sonars (MSIS).

6.3.6 Forward-looking Sonar

Beim vorwärtsschauenden Sonar (engl. *forward-looking sonar, FLS*), manchmal auch *sector scanning sonar*) wird ein nach vorwärts unten gerichteter Schallpuls in einem Winkelbereich (meistens elektronisch) geschwenkt. Je nach Modell variieren typische Winkelbereiche zwischen 25° und 130° . Dies ist schematisch in Abbildung 6.16 dargestellt. Die Wiederholrate ist deutlich höher als bei einem MSIS, es werden durchaus 10–15 Hz erreicht. Die Maximalreichweite ist u. a. abhängig von der Frequenz des Sonars und kann als Richtwert zwischen 30 m und 130 m angenommen werden.

Die Bilder von MSIS und FLS sind wie beim SSS durch einen Menschen recht gut interpretierbar. FLS kommen auch als Hindernismeidensonar (engl. *obstacle avoidance sonar*) zum Einsatz.

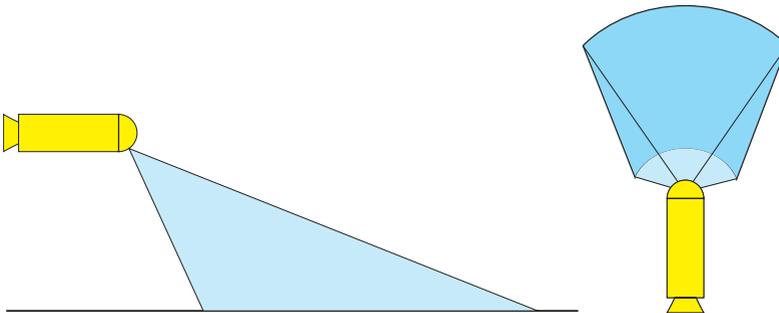


Abbildung 6.16: Schemazeichnung des Aufnahmebereichs eines forward-looking Sonars (FLS) von der Seite (links) und aus der Vogelperspektive (rechts).

DIDSON

Ein besonders bekannter Vertreter der FLS ist das sogenannte DIDSON (Dual Frequency Identification Sonar) von Sound Metrics¹³. Es arbeitet mit zwei Frequenzen: 1 MHz und 1,8 MHz bei einer Reichweite von bis zu 40 m respektive 12 m bei der hohen Frequenz. Der Öffnungswinkel ist eher schmal und beträgt azimuthal $\varphi_a = 29^\circ$ und vertikal $\varphi_e = 12^\circ$. Aufgrund der hohen Bildwiederholrate von bis zu 20 Hz und des charakteristischen Sonar-Schattenwurfes spricht man hier auch oft von der akustischen Taschenlampe (engl. *acoustic torchlight*), die es einem Menschen ermöglicht, sehr schnell einen Eindruck der Umgebung und der Geschehnisse zu bekommen. Abbildung 6.17 zeigt Beispielbilder eines DIDSON.

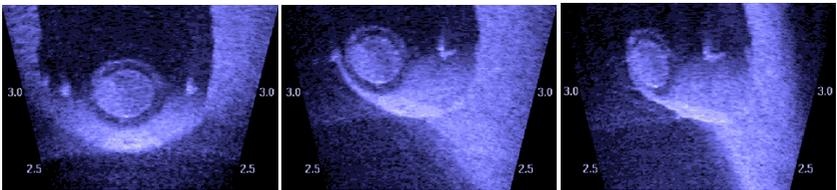


Abbildung 6.17: Beispielbilder aus einer Bildfolge eines DIDSON FLS. Gezeigt ist eine Manta-Unterwasserminne.

© SoundMetrics. Captured with a Sound Metrics imaging sonar.

6.3.7 Synthetisches Apertursonar

Im Gegensatz zum Sidescan-Sonar wird beim synthetischen Apertursonar (SAS) bei sehr ähnlicher Anbringung der Transducer am Fahrzeug die Antennencharakteristik in along track Richtung deutlich breiter gewählt, so dass ein großer Überlapp der durch die einzelnen Pings beschallten Bereiche entsteht. Ein weiterer wesentlicher Unterschied zum Sidescan-Sonar ist die gleichbleibende Auflösung über den gesamten Scanbereich hinweg. Sie hängt bei einem SAS-System nicht mehr von der across-track Reichweite ab wie beim Sidescan-Sonar, sondern nur von der Länge des Transmitters. Kurze Sendeantennen sorgen für eine bessere Auflösung [Lur10]. Durch digitale Signalverarbeitung wird im Nachhinein eine synthetische

¹³ <http://www.soundmetrics.com/Products/DIDSON-Sonars> zuletzt abgerufen am 01.10.2015

Fokussierung des Bildes durchgeführt. Das Prinzip ist hinlänglich aus der Radardatenverarbeitung (Synthetisches Aperturradar, SAR) bekannt und bringt die gleichen Anforderungen mit sich: Die Positionsgenauigkeit der Trägerplattform muss üblicherweise besser sein als $\lambda/8$ [Lur10], was im Unterwasserbereich schwerer einzuhalten ist, da Störungen der Plattformstabilität durch Strömung deutlich stärker ausgeprägt sind als bei SAR-Systemen. Über die gesamte Länge der synthetischen Apertur muss die Kohärenz der Phase gewährleistet sein, da sich die Bildqualität sonst extrem verschlechtert [Cal03b]. Eine weitere Besonderheit von SAS ist die Tatsache, dass man aus den SAS-Berechnungen Geschwindigkeitsinformationen gewinnen kann, die hilfreich für die Erstellung der synthetischen Apertur sind: Fährt man langsam genug bzw. ist die Empfänger-Wandlerkette lang genug, kann man zwei Messungen, die vom gleichen Ort aus gemacht wurden, miteinander korrelieren. Das geht allerdings nur, wenn man zwischen zwei Pings nur höchstens eine halbe Antennenlänge¹⁴ gefahren ist. Deshalb sind lange Empfängerarrays und kurze Sendearrays bei SAS wünschenswert [Lur10]. Bei der so erhaltenen Geschwindigkeitsschätzung spricht man von SAS-Mikronavigation [Bel02b]. Bei nicht geradeaus verlaufender Trajektorie muss zudem die Topographie bzw. Bathymetrie des Bodens bekannt sein, um die SAS-Bilder korrekt fokussieren zu können [Han11]. Im Vergleich mit SAR wird die SAS-Bildgebung durch i. A. stärkere Störungen innerhalb des Mediums negativ beeinflusst.

Bei einem SAS werden durch die Art der Datenverarbeitung überlappende Datenkacheln erzeugt und keine Einzellinien wie beim Sidescan-Sonar. Zudem nimmt ein SAS-System im Unterschied zum Sidescan-Sonar nicht nur die Amplitude des Systems auf, sondern benötigt für die SAS-Berechnungen auch die Phaseninformation des Signals. Wegen der Bestrahlung durch einen sehr breiten Schallstrahl sind Objektschatten weniger ausgeprägt. Dies ist in Abbildung 6.18 dargestellt. Es existieren jedoch Verfahren, schärfere Schatten zurückzugewinnen [Gro06].

Die im Radarbereich gängige Spotlight-Betriebsart, bei der der Strahl während der Vorbeifahrt auf ein Objekt geschwenkt bleibt, ist bei SAS unüb-

¹⁴ Die halbe Antennenlänge kommt durch die Bildung von virtuellen Sender-/Empfängerpaaren. Diese virtuelle Antenne (engl. *displaced phase center antenna*, *DPCA*) hat nur die halbe Länge.

lich. Hier bleibt der Strahl immer gleich ausgerichtet und man spricht im Englischen von der Betriebsart *stripmapping* [Cal03b].

Die Wahl der Frequenz ist bei einem SAS-System weniger durch Auflösungsziele motiviert, sondern hängt von der gewünschten Reichweite, der Eindringtiefe ins Sediment, der Baugröße oder den gewünschten Reflektanzeigenschaften ab. Bei gegebener Wandlergröße strahlen tiefere Frequenzen weniger gebündelt ab, was durch den gewünscht breiten Strahl für SAS im Gegensatz zu Sidescan-Sonaren kein Nachteil ist.

In Pailhas et al. [Pai10b] wird die maximale Geschwindigkeit von Sidescan-Sonaren und SAS abhängig von der gewünschten Auflösung along track verglichen. Im Ergebnis kann mit SAS-Sensorik bei vergleichbar feiner Auflösung deutlich schneller gefahren werden als mit einem Sidescan-Sonar.

Einen umfangreichen Einstieg in die Besonderheiten der Datenaufnahme durch ein synthetisches Apertursonar gibt Hansen in [Han11]. Gängige Verfahren zur SAS-Satzenverarbeitung zeigt Callow in [Cal03b], während ganz aktuelle Forschungsarbeiten zur SAS-Datenverarbeitung bei Leier [Lei14] zu finden sind.

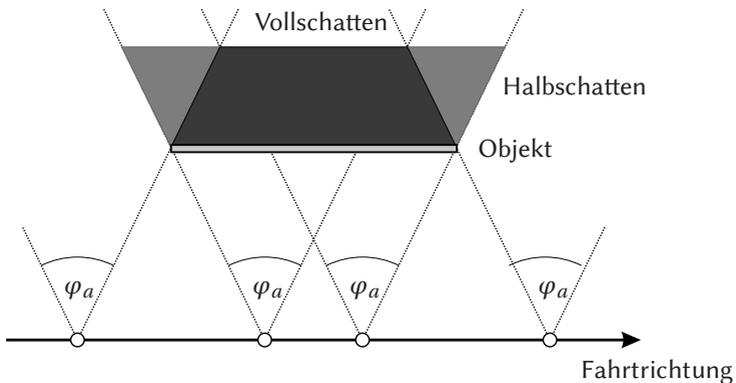


Abbildung 6.18: Schemazeichnung des Schattenwurfs bei synthetischem Apertursonar. Ein Objekt (hellgraues, schmales Rechteck) wird von mehreren Aufnahmepositionen aufgenommen (weiße Kreise). Durch die große Beambreite findet an den Rändern ein Übergang von Halbschatten zu Vollschatten statt. Die genaue Form und Abstufung hängen von der Beambreite und von den Aufnahmepositionen ab.

6.3.8 Interferometrisches Sidescan-Sonar

Beim interferometrischen Sidescan-Sonar (IS), manchmal auch bathymetrisches Sidescan-Sonar (engl. *swath bathymetry sidescan, SBS*) genannt, besteht ein Sonarkopf aus mehreren Transducern (meist zwei, aber es existieren auch Systeme mit vier bis sechs Wandlern), die auf dieselbe Frequenz abgestimmt sind. Ein Sendewandler sendet einen Schallpuls und alle Empfangswandler nehmen das Echo auf. Interferometrische Sidescan-Sonare zeichnen im Gegensatz zum normalen Sidescan-Sonar das komplexe Empfangssignal (Betrag und Phase) auf. Dadurch, dass die Abstände zwischen den Transducern bekannt sind, kann aus der Phasendifferenz die Herkunftsrichtung des Signals bestimmt werden. Damit ist das IS nicht nur bildgebend, sondern gleichzeitig auch profilbildend. In Abbildung 6.19 ist der Sachverhalt veranschaulicht. Der Winkel des Echos berechnet sich aus dem Phasenunterschied $\Delta\varphi$ zu:

$$\Delta\varphi := \frac{2\pi}{\lambda} \Delta R = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta_i \quad , \text{woraus folgt: } \theta_i = \arcsin \left(\frac{\Delta\varphi}{\frac{2\pi}{\lambda} d} \right). \quad (6.3)$$

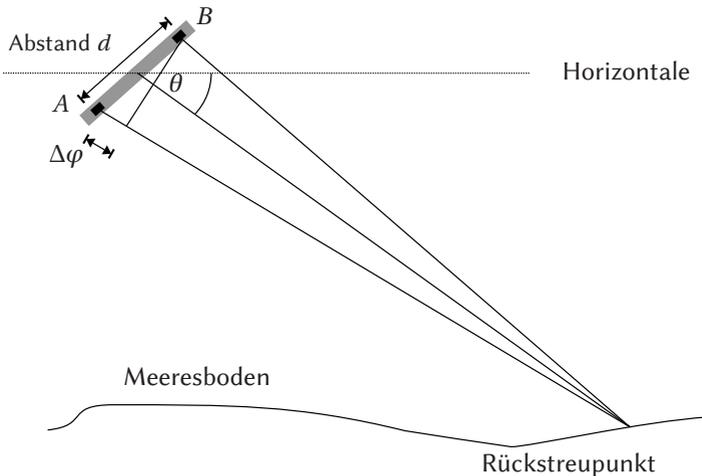


Abbildung 6.19: Interferometrische Sonarsignalaufnahme für zwei Transducer A und B. Aus dem Phasenunterschied des Signals an den Empfängern kann der Eintreffwinkel geschätzt werden.

Der Vorteil gegenüber klassischen Sidescan-Sonaren ist, dass die Bathymetriedaten in der gleichen Auflösung und vor allem am gleichen Ort wie die Bilddaten gewonnen werden [Blo09]. Das erlaubt eine einfache Registrierung der Daten. Nachteilig ist, dass die Datenauswertung eines IS sehr empfindlich gegenüber Rauschen und gegenüber Kalibrierungsfehlern der Transducer im Sonarkopf ist [Lur10]. Nah am Nadir ist die Datenqualität aufgrund der dort geringeren Auflösung und dem Verlust der Kohärenz schlechter.

Ebenfalls anspruchsvoll ist es, die Phaseninformation auszuwerten, da sie nur Modulo- 2π vorliegt und damit zunächst mehrdeutig ist [Lur10]. Die an den Modulo-Grenzen der Phase entstehenden Diskontinuitäten, die *fringes* genannt werden, müssen durch Methoden des Phasenabwickelns (engl. *phase unwrapping*) zu einer kontinuierlichen Phase zusammengesetzt werden [Mas08]. Dieses Problem ist nicht trivial zu lösen [Mol07]. Ein IS kann bei entsprechenden Wandlergeometrien große Öffnungswinkel erreichen und erreicht damit eine hohe Flächenleistung bei Kartierungsaufgaben.



Abbildung 6.20: Schematischer Aufbau eines interferometrischen Sonarkopfes mit mehreren Empfängern. Durch mehr als zwei Empfänger kann die Phasenmehrdeutigkeit auch im Fall von Mehrwegeausbreitung korrekt aufgelöst werden. Die Abstandsweite sind als Beispiel zu verstehen und wurden aus [Bat15] für ein Bathyswath-XL System berechnet.

Eine Weiterentwicklung der IS sind Sonare mit N Transducern, die damit $N-1$ Winkelmehrdeutigkeiten im inkohärenten Fall auflösen können und damit in Fällen von starkem Layover (Abschnitt 6.3.3.4) die Geometrie dennoch korrekt schätzen können. Im kohärenten Fall können immerhin noch $N/2$ Mehrdeutigkeiten aufgelöst werden. Ein Beispiel eines IS-Sonarkopfes mit mehreren Wandlern ist in Abbildung 6.20 gegeben. Das bekannteste Datenauswerteverfahren in diesem Zusammenhang dürfte das patentierte CAATI-Verfahren (engl. *Computed angle of arrival transient imaging*) sein [Kra98; Kra00].

In Gostnell [Gos04] wird die Datenqualität von interferometrischen Sidescan-Systemen untersucht. Die Autoren kommen zum Ergebnis, dass die höhere Standardabweichung in den Profildaten verglichen mit Referenzdaten eines Multibeam-Sonars (Abschnitt 6.3.11) der höheren Datendichte geschuldet sei. Die resultierenden Oberflächen seien jedoch sehr ähnlich zu den Referenzmessungen und interferometrische Sonare brächten eine höhere Effizienz im Vergleich zu Flachwasser-MBES-Systemen. Ein schematischer Vergleich zwischen den Systemen ist in Abbildung 6.21 illustriert.

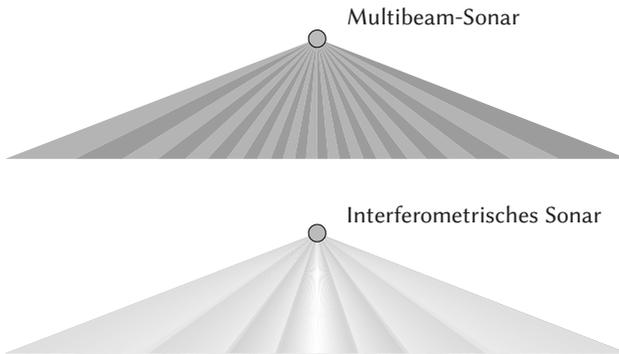


Abbildung 6.21: Schematischer Vergleich von MBES (oben) und IS (unten). Während das MBES eine feste Anzahl an Beams hat (die aber nicht unbedingt äquiangular verteilt sein müssen), wertet das IS die Phasenlage für jedes Zeitsample aus.

6.3.9 Interferometrisches SAS

Werden die vorangegangenen Techniken von IS und SAS kombiniert, erhält man ein interferometrisches SAS (InSAS oder IF-SAS). Durch die Interferometrie erhält man eine Schätzung der 3D-Gestalt des Bodens, die ihrerseits verwendet wird um die SAS-Daten zu fokussieren.

6.3.10 Scannendes Pencil-Beam Sonar

Beim scannenden Pencil-Beam-Sonar wird wie beim MSIS ein Transducer mechanisch rotiert, allerdings ist der Beam in beide Richtungen »bleistiftartig« schmal (der namensgebende *pencil beam*) und es wird nur der Abstandswert des ersten starken Echos zurückgegeben. Es handelt sich also um ein profilbildendes System.

6.3.11 Multibeam-Echosounder / Fächerecholot

Beim Fächerecholot, das gängiger als Multibeam-Sonar (engl. *multi-beam echo sounder*; MBES) bezeichnet wird, wird der abzutastende Winkelbereich durch einen Fächer von *pencil beams* aufgespannt.

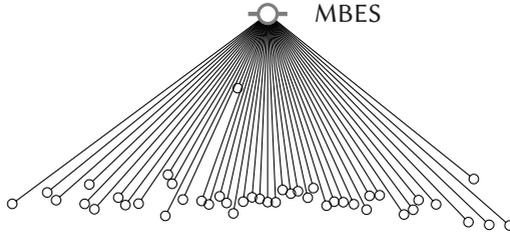


Abbildung 6.22: Datenaufnahme eines MBES mit fächerförmigen Einzelstrahlen, für die jeweils ein Abstandswert zum ersten oder stärksten Reflektor gewonnen wird.

Für jeden Strahl kann durch die Laufzeit bis zur Reflexion am Grund ein Tiefenwert und damit eine Elevationskarte für den überfahrenen Bereich errechnet werden. Die entstehenden Daten sind mit denen eines Einzeilen-Laserscanners aus der Landrobotik vergleichbar. Die Strahlen werden im Gegensatz zum scannenden Pencil-Beam-Sonar gleichzeitig ausgesendet.

Typische MBES erreichen Öffnungswinkel von etwa 120–165 Grad bei 256–512 Strahlen. Moderne MBES können durch elektronische Strahlsteuerung auch nicht-uniforme Strahlverteilungen im Fächer erzeugen um einen Teilbereich höher aufgelöst wiederzugeben. Dieser Modus ist etwa bei der Pipelineinspektion interessant. Manche MBES bieten die Funktion einer Mehrfachdetektion pro Strahl. Damit wird nicht nur das erste oder stärkste Echo verwendet, sondern es werden mehrere Punkte pro Strahl ausgegeben, die zu starken Echos gehören.

Durch den hohen Hardwareaufwand (ein Transducer pro Strahl) sind MBES in der Anschaffung deutlich teurer als Sidescan-Sonare.

Da ein Multibeamsonar weniger Strahlen besitzt als die zeitliche Auflösung des interferometrischen Sonars, ist die räumliche Auflösung des interferometrischen Sonars höher. Die Genauigkeit eines MBES ist im Nadir am besten und fällt zu den Rändern hin ab, also komplementär zum Verhalten eines IS. Für Aufnahmen mit einem Multibeamsonar wird bei längeren Schallwegen ein SVP benötigt, das die Strahlkrümmung korrigiert und damit die gemess-

senen Entfernungswerte berichtigt. Dies ist insbesondere für schiffseitig montierte MBES wichtig, die durch die obersten Wasserschichten messen, in denen potentiell große Temperaturunterschiede herrschen (siehe Abschnitt 3.2.1). Wird diese Korrektur für schiffseitig montierte MBES nicht durchgeführt, kann es schwierig werden, die von der International Hydrographic Organization (IHO) geforderte Genauigkeit (Anhang B.2.2) zu erreichen.

Snippets

Zusätzlich kann man bei einem MBES nicht nur den Zeitpunkt der ersten Reflexion pro Strahl auswerten, sondern kann prinzipiell (wie beim Sidescan-Sonar) für jeden Strahl die gesamte Amplitude über der Zeit betrachten. Aufgrund der sehr großen Datenmenge, die anfällt, wenn für jeden Beam das volle Zeitsignal abgespeichert wird, werden üblicherweise nur die Bereiche um die Haupt-Reflexion des Bodens herum betrachtet. Durch Fusion der Intensitätswerte um die Bodenkontakte der Einzelstrahlen herum erhält man ein hochauflösendes Bild, das im Prinzip ebenso zu interpretieren ist wie die Daten eines Sidescan-Sonars (sog. Pseudo-Sidescan). Dadurch kann man hochaufgelöste Reflektanzinformation und Reliefinformation koregistrieren und schafft so einen Mehrwert für den Benutzer des Systems [Loc04]. Diese bzw. vergleichbar arbeitenden Betriebsmodi heißen je nach Anbieter unterschiedlich: Snippets (Teledyne Reson¹⁵), TruePix™(R2Sonic¹⁶) oder Footprint Time Series (Fugro¹⁷).

6.3.12 Subbottom-Profiler

Für Fragestellungen zur Sedimentschichtung hilft die Gestalt der Oberfläche alleine nicht weiter und daher werden sog. Subbottom-Profiler verwendet, um diese Schichtung in der Tiefenrichtung aufzunehmen. Subbottom-Profiler sind Sonare, die mit niedriger Frequenz arbeiten, da diese tiefer ins Sediment eindringen können (vgl. auch Abschnitt 4.2.4). Dabei werden vorrangig Frequenzen zwischen einem und zwanzig Kilohertz benutzt. In den 60er Jahren etablierten sich 3,5 kHz-Profiler, die gemäß den Abbildungen aus Caress [Car10] bereits Eindringtiefen von 100 Metern und mehr erreichten.

¹⁵ <http://www.teledyne-reson.com> zuletzt abgerufen am 01.10.2015

¹⁶ <http://www.r2sonic.com> zuletzt abgerufen am 01.10.2015

¹⁷ <http://www.fugro-pelagos.com> zuletzt abgerufen am 01.10.2015

Allerdings sind zur Erzeugung niedriger Frequenzen große Membranen (oder sehr großer Membranhub) nötig, was den Einsatz von Subbottom-Profilern in AUVs schwierig macht. Dort werden dann meist Systeme mit etwas höherer Frequenz verwendet, zum Beispiel arbeitet das Subbottom-Modul für AUVs von Teledyne Gavia zwischen 14 und 21 kHz¹⁸.

Moderne Subbottom-Profiler mit Chirp-Technik (siehe Abschnitt 8.3.3.4) können ebenfalls über 100 Meter tief ins Sediment reichen, haben dabei aber eine viel höhere Auflösung [Hen06].

Hochfrequentes Subbottom-Profilung wurde in Mindell et al. [Min01] untersucht. Hier wurde mit 150kHz und einem normalen Transducer eines Sidescan-Sonars gearbeitet, der aber zum Boden hin ausgerichtet war. Unter Inkaufnahme starker Dämpfung konnten hoch auflösende Aufnahmen der oberen ein bis zwei Meter Sediment gemacht werden.

6.3.13 3D-Sonare

Eine vergleichsweise neue Entwicklung auf dem Markt sind 3D-Sonare. Hier wird mit einem zweidimensionalen Empfängerarray gearbeitet, welches erlaubt, flächig Tiefenwerte aufzunehmen [Han98]. Je nach Bildwiederholrate können damit z. B. Taucher in Echtzeit überwacht werden. 3D-Sonare stellen insbesondere für den Einsatz in der Tiefsee immer noch ein aktuelles Forschungsgebiet dar [Ehr15]. Außerdem werden aktuell Selbstfokussier-Verfahren durch geschirpte Sonarpulse für linsenbasierte Unterwasser-3D-Sonare erforscht [Say13; Say15].

6.3.14 Parametrisches Sonar

Bei parametrischen Sonaren werden zwei nahe beieinander liegende Frequenzen f_1 und f_2 mit sehr hohem Schalldruck abgestrahlt, aus denen durch nichtlineare akustische Effekte im Wasser die Frequenzen $2f_1$, $2f_2$, $f_1 \pm f_2$, und höhere Harmonische entstehen [Sim06]. Der Effekt, genannt *non-linear mixing*, kommt aus dem Verhalten im Nahfeldvolumen des Sonarwandlers. Dort bewegen sich Wellenberge schneller als Wellentäler und eine Sinusschwingung verformt sich mehr in Richtung einer Sägezahnkurve. Das ganze

¹⁸ http://teledynegavia.com/product/payloads_options/sub-bottom-profiling-module zuletzt abgerufen am 01.10.2015

Nahfeldvolumen sendet die Schallwellen aus, wodurch sich eine *endfire*-Konfiguration ergibt, die den Schall in einem sehr schmalen Strahl aussendet [Wil05]. Das Phänomen ist mit der Kavitation (siehe Abschnitt 3.4.2.2) verwandt. Hier wird normalerweise der nichtlineare Bereich kurz vor Eintreten der Kavitation betrachtet. Aktuelle Entwicklungen bringen das Medium absichtlich zu gezielter Kavitation vor den Transducern um den nichtlinearen Effekt zu verstärken und eine höhere Effizienz zu erreichen [Ruf04].

In der Praxis ist die Verwendung der Frequenz $|f_1 - f_2|$ am interessantesten, obwohl weniger als 1 Prozent der Schallenergie in diese Frequenz umgewandelt wird [Gri06]. Diese deutlich tiefere Frequenz kann so mit kleineren Transducern und dennoch enger Beambreite erzeugt werden. Die tiefen Frequenzen können aufgrund der höheren Eindringtiefe Objekte sichtbar machen, die durch Sediment zugeschüttet sind [Ros15]. Zusätzlich bleibt die Bandbreite um die Ursprungsfrequenz auch für die Differenzfrequenz erhalten, was bedeutet, dass tiefe Frequenzen mit gleichzeitig sehr großer Bandbreite erzeugt werden können [Wil05].

Nichtlinearitätsparameter für Wasser und andere Flüssigkeiten für unterschiedliche Temperaturen sind in [Ros14] tabelliert.

6.3.15 Breitbandsonar

Recht neu ist die Entwicklung extrem breitbandig arbeitender Sonare. Dadurch soll der Natur nachempfunden werden, dass Meeressäuger sich das frequenzabhängige Reflexionsverhalten resonanter Objekte zunutze machen, um sie unterscheiden zu können [Pai10a]. Diese Rückstreueigenschaft wird bisher zur Fischklassifikation eingesetzt, soll aber im System von Pailhas et al. [Pai10a] namens »BioSonar« zur Unterscheidung von menschlich hergestellten Objekten (wie z. B. Minen) dienen. Das untersuchte System hat nominell eine Bandbreite von 30–130 kHz, von der das Band von 80–110 kHz zur Klassifikation herangezogen wird [Pai10a; Pai14a].

6.4 Biologischer Einfluss

Oft wird die Frage aufgeworfen, inwieweit Sonarsensorik einen Einfluss auf Unterwasserlebewesen besitzt¹⁹. Dieser besteht unbestritten, vor allem jedoch bei Meeressäugern und weniger bei Fischen. Der Grund ist, dass manche Wal- und Delfinarten durchaus Töne bis zu 300kHz[Lur10] bzw. 180kHz [Ros14] erzeugen und auch hören können, wohingegen Fische im Gegensatz zu den Meeressäugern nur unterhalb von wenigen Kilohertz hören können und es daher auch nur wenige Fischarten gibt, die Frequenzen oberhalb von 5kHz produzieren [Lur10]. Nur ganz wenige Fischarten hören noch höhere Frequenzen. Obwohl Fische also im Allgemeinen nicht gut hören, ist auch bei ihnen eine Meidung von Schiffen sichtbar, obwohl nicht abschließend geklärt ist, ob die Meidung eine direkte Folge des Schalldrucks ist, oder ob die Sonarsignale mit denen von fischfressenden Walen verwechselt werden [Lur10]. Interessierte Leser finden etwa bei Goldbogen et al. [Gol13] oder DeRuiter et al. [DeR13] weitere Informationen zum Einfluss von Sonaren speziell auf Meeressäuger und bei Lurton [Lur10] noch detaillierte Informationen zur akustischen Verschmutzung und ihren Einfluss auf die Meeresbewohner.

¹⁹ <http://www.welt.de/wissenschaft/umwelt/article117649224/Sonar-von-Kriegsschiffen-verwirrt-Blauwale.html>, zuletzt abgerufen am 02.09.2016

Stand der Technik und Forschung zur Sonardatenverarbeitung

Dieses Kapitel gliedert sich wie folgt: Zuerst wird ausgeführt, welche Navigationssensorik einem autonomen Unterwasserfahrzeug zur Verfügung steht, dann wird ein Überblick über die klassische Sonardatenverarbeitung von Sidescan-Daten gegeben, wie etwa die Mosaikierung. Des Weiteren werden auf Sonardaten verwendete Methoden der 2D-Bildverarbeitung betrachtet. Kurz wird auch auf Arbeiten zu Feature-Tracking für FLS eingegangen und gezeigt, wie Klassifikationsverfahren auf bildhaften Sonardaten verwendet werden.

Der Rest des Kapitels widmet sich dem Stand der Technik zur Unterwasserkartenerstellung und der Rekonstruktion aus Sonardaten. Diese beiden Themen sind schwierig zu trennen, denn es ist nicht immer klar, wo reine Rekonstruktionsarbeiten aus den Sonardaten enden, und wo Fragestellungen der Kartenerstellung und Eigenbewegungsschätzung beginnen, da diese beiden Themen teilweise über SLAM-Verfahren gekoppelt stattfinden.

SLAM-Verfahren schätzen nicht nur eine Umgebungskarte, sondern gleichzeitig findet auch eine Lokalisierung in dieser Karte statt. Das geschieht dadurch, dass SLAM-Verfahren ausnutzen, wenn von einer vorherigen Beobachtung bekannte Orte durch die aktuellen Sensordaten wiedererkannt werden. Im Falle des Unterwasserfahrzeugs kann bei einer weiteren Überfahrt über ein zuvor aufgenommenes Objekt durch die Ähnlichkeit der Oberflächegeometrie der beiden Durchläufe eine Zuordnung der beiden Orte zueinander stattfinden. Aufgrund dieser Information, dass man sich nun wieder am gleichen Ort befindet, wächst der Navigationsfehler (den man aufgrund der Sensorunsicherheit ohnehin immer hat) nicht mehr unbegrenzt.

Daher wird der in dieser Arbeit nur gestreifte Bereich der SLAM-Verfahren zuerst abgehandelt, während Arbeiten, die sich auf die Rekonstruktionsaufgabe fokussieren, später im Kapitel vorgestellt werden. In den zugehörigen Abschnitten wird versucht, einen Überblick über die Arbeiten in dem jeweiligen Bereich zu geben, wobei der Blick hier etwas weiter gefasst wird:

Es werden nicht ausschließlich Arbeiten über Sidescan-Sonare vorgestellt, sondern auch Arbeiten mit anderen als nur bildgebenden Sonaren und Arbeiten zur Sensorfusion von Sonaren mit optischen Sensoren.

7.1 AUV Lokalisierung und Navigation

Eine Übersicht über Navigation und Lokalisierung für AUVs ist in Paull et al. [Pau14] und Kinsey et al. [Kin06] zu finden. In Maurelli [Mau14] wird der aktuelle Stand der Technik zu Lokalisierungsverfahren für AUVs zusammengefasst. Hagen et al. [Hag07] diskutieren Designentscheidungen für einen möglichst hohen Grad an Autonomie bei AUVs. Im Folgenden werden die wichtigsten Bestandteile und Navigationsmethoden vorgestellt.

7.1.1 Koppelnavigation

Die Sensorausstattung eines AUVs umfasst normalerweise eine Inertialmesseinheit (engl. *inertial measurement unit*, *IMU*) bestehend aus Beschleunigungssensoren (Accelerometern) und Drehratensensoren (Gyroskopen). Durch zeitliche Integration der Messwerte wird eine Positions- und Orientierungsschätzung erhalten. Da GPS-Information im Allgemeinen für das Fahrzeug nur an der Wasseroberfläche verfügbar ist, ist es wichtig, dass die Güte der Inertialmesseinheit besonders hoch ist, da bei reiner Koppelnavigation die Unsicherheiten über die Missionsdauer kumulieren. Mit besonders genauen Drehraten- und Beschleunigungssensoren kann die Erddrehung erkannt werden und dadurch eine sog. Nordsuche erfolgen, die den geografischen Nordpol als Punkt auf der Drehachse der Erde bestimmt. Je nach Einsatzgebiet werden in AUVs auch Magnetometer eingebaut (manchmal sind bereits welche in der Inertialmesseinheit enthalten), etwa zur Pipeline-/Kabelverfolgung oder zur Erkennung bestimmter Gesteine. Die statischen Magnetfelder durch ferromagnetische Teile innerhalb des AUV müssen durch Kalibrierung entfernt werden. Beim Einbau muss sorgfältig darauf geachtet werden, dass es durch die wechselnden Magnetfelder von Elektroantrieben und Stromleitungen im Fahrzeug nicht zu Beeinträchtigungen kommt. Aus diesem Grund werden Magnetometer oft hinter dem Fahrzeug an einem Schleppfisch gezogen. Ebenfalls praktisch immer in AUVs verbaut ist ein Drucksensor zur Tiefenbestimmung innerhalb der Wassersäule.

7.1.2 Stützung der Koppelnavigation

Üblicherweise ist in AUVs auch ein auf dem Doppler-Effekt basierender Geschwindigkeitsmesser (engl. *doppler velocity log*, *DVL*) eingebaut, der über den Dopplereffekt die Geschwindigkeit des Fahrzeugs relativ zum Grund misst. Mit diesem zusätzlichen Geschwindigkeitssensor kann die Koppelnavigation gestützt werden. Das ist besonders effektiv, da zur Positionsbestimmung die Daten eines Geschwindigkeitssensors nur einmal integriert werden müssen und der Fehler durch die Sensorunsicherheit nur linear eingeht statt quadratisch wie bei der doppelten Integration des Beschleunigungssensors. Mit DVL und einer genauen IMU liegt der Fehler der Koppelnavigationsposition in der Größenordnung von etwa 0,1 % der gefahrenen Distanz (engl. *distance traveled*, *DT*) [Lar00]. Fahrzeuge mit extrem hochwertiger Sensorik schaffen bei geeigneten Trajektorien auch 0,01 %–0,05 % DT [Med11]. Sind IMU und DVL mit den Schätzalgorithmen in einem Gerät kombiniert spricht man im Unterwasserbereich häufig von einem Inertialnavigationssystem (engl. *Inertial Navigation System*, *INS*). Besteht noch kein Bodenkontakt (sog. *fix*) des DVL, etwa beim Auf- oder Abtauchen, bietet ein DVL meistens auch die Möglichkeit, die Geschwindigkeit relativ zur umgebenden Wassersäule zu messen. Diese Betriebsart wird dann ADCP (engl. *acoustic doppler current profiler*) genannt und verwendet die Rückstreuung von Schwebepartikeln im Wasser. Diese Messwerte sind aufgrund von möglichen Strömungen jedoch deutlich ungenauer für die AUV Lokalisierung: Brokloff [Bro94] zeigt Ergebnisse zwischen 0,33 % und 0,51 % DT. Ist ein SAS im AUV verbaut, kann über die Korrelation der Sonardaten an den Empfänger-elementen eine sog. Mikronavigation zur Erstellung der synthetischen Apertur geschätzt werden (siehe Abschnitt 6.3.7). Diese Mikronavigation zwischen zwei Zeitschritten ist natürlich nicht nur für die Erstellung der SAS-Daten nutzbar, sondern kann ebenfalls als Geschwindigkeitssensor für die Stützung der Koppelnavigation ähnlich einem DVL eingesetzt werden.

7.1.3 Zustandsschätzer

Die genannten Sensordaten werden normalerweise nicht einfach über die Zeit integriert sondern werden von Navigationsfiltern verarbeitet. Bei der Navigation von autonomen Unterwasserfahrzeugen kommen ähnliche Verfahren wie bei der Navigation von Luftfahrzeugen zum Einsatz. Diese sind aus-

giebig in verschiedenen Büchern beschrieben [Gro08; Tit04; Wen07; Bek07]. Im Unterwasserbereich sind die Anforderungen jedoch etwas anders, insbesondere was die Geschwindigkeit der Plattform, den Einfluss von Strömungen und die unter Wasser fehlende Satellitenunterstützung betrifft [Woo10a]. Zu diesem Zweck wurden besondere Navigationsfilter entwickelt wie z.B. in Geng et al. [Gen10]. In vielen Fällen kommen zusätzlich Dynamikmodelle des AUV zum Einsatz (Fauske et al. [Fau07b; Fau07a], Hegrenæs et al. [Heg07; Heg11; Heg08]), die die hydrodynamischen Eigenschaften eines AUV beschreiben und damit die Schätzung auf die plausiblen Bewegungen eines solchen Fahrzeugs einengen. Manche Autoren verwenden sogar eine umfangreiche Gesamtsimulation von der AUV-Regelung bis zur Datenaufnahme [Gad04; Gad98].

7.1.4 Absolute Referenzierung

Um eine absolute Ortsreferenzierung auch ohne Satellitenunterstützung durchführen zu können, gibt es für Unterwasserfahrzeuge noch die Möglichkeit über Laufzeit-Messungen (engl. *time of flight*) und Trilaterations- bzw. Triangulationsverfahren ihre Position zu bestimmen oder per USBL (Abschnitt 7.1.4.3) die GPS-Information zum AUV zu transportieren und ins Navigationsfilter einfließen zu lassen [Man01]. Fast allen diesen Konfigurationen ist gemein, dass sich das Fahrzeug in einem zuvor abgesteckten Bereich oder in der Nähe eines Mutterschiffs befinden muss, was eine unbegrenzte Exploration unmöglich macht. Alle im Folgenden genannten Verfahren gehen von konstanter Schallgeschwindigkeit aus. Abweichungen von der erwarteten Schallgeschwindigkeit führen zu Lokalisierungsfehlern. Eine Kurzübersicht wird im Folgenden gegeben, detailliertere Beschreibungen der Konfigurationen sind in Johnston [Joh14], Vickery [Vic98] und Blondel [Blo09] gegeben. Auch wenn im Folgenden nur von AUVs die Rede ist, kommen die genannten Verfahren durchaus auch bei ROVs zum Einsatz.

7.1.4.1 Long Baseline – LBL

Bei LBL werden vor dem Aussetzen des AUV aktive Transponder am Meeresboden an absolut bekannten Positionen verankert, die ein akustisches Identifikationssignal senden. Durch Trilateration zu den Transpondern kann das AUV seine Position bestimmen. Fehler in der Abstandsbestimmung zum

Transponder führen bei LBL nur zu Fehlern gleicher Größenordnung bei der Lokalisierung. Hochgenaues LBL mit 300 kHz oder mehr erlaubt eine sub-Zentimeter genaue Positionierung in der Ebene parallel zur Bodenebene bei ca. 10Hz Updaterate. Allerdings ist die Reichweite durch die hohe Frequenz nicht sehr groß. Daher wird es verwendet, wenn in einem kleinen Gebiet sehr präzise Lokalisierung notwendig ist. Für Navigation in der gesamten Wassersäule wird meistens LBL mit 12 kHz eingesetzt. Die Genauigkeit ist abhängig von der Position des Fahrzeugs zu den Transpondern und bewegt sich im Bereich von 0,1–10 m [Kin06]. Die Updaterate ist durch die Schallgeschwindigkeit begrenzt und kann durchaus nur eine Messung alle 20s oder noch seltener betragen. LBL ist für mehrere Fahrzeuge, die sich gleichzeitig lokalisieren wollen, nicht gut geeignet: Da die Kommunikation nach dem TDMA-Verfahren (*time division multiple access*) mit Zeitslots arbeitet, reduziert sich die Updaterate proportional mit der Anzahl der Fahrzeuge [Kin06]. LBL existiert auch in einer invertierten Variante: Die aktiven Transponder schwimmen als Boje an der Oberfläche und bestimmen laufend per GPS ihre Position. Damit kann das AUV analog zum normalen LBL ebenfalls seine Absolutposition bestimmen.

7.1.4.2 Short Baseline – SBL

SBL wird vereinzelt noch eingesetzt, ist inzwischen aber fast vollständig durch USBL ersetzt worden. Bei SBL trägt das AUV einen Transponder und das absolut referenzierte Mutterschiff trägt mehrere Empfänger in bekannter Konfiguration. Dann kann mithilfe der Schalllaufzeitdifferenzen bestimmt werden, wie das Mutterschiff relativ zum AUV orientiert ist. Die Genauigkeit gegenüber LBL ist dabei geringer, allerdings muss kein Transponder fest am Meeresgrund ausgebracht werden. Die Information über die Position des AUV befindet sich dann aber nur auf dem Mutterschiff und muss dem AUV erst noch per Akustikmodem mitgeteilt werden.

7.1.4.3 Ultra Short Baseline – USBL

Bei USBL (manchmal auch *Super Short Baseline*, *SSBL*) reicht, wie bei SBL, ein Transponder am AUV. USBL funktioniert ganz ähnlich zu SBL, nur dass die Transponder nicht über das gesamte Mutterschiff verteilt sind, sondern dass sich auf einem (zum GPS des Mutterschiffs referenzierten) Sensor mehrere

Sende-/Empfangsmodule befinden. Bei besonders modernen USBL-Empfängern ist sogar ein vielzelliges Empfängerarray verbaut, welches Beamsteering (Abschnitt 6.3.3.5) ermöglicht. Durch diese Antennenkonfiguration mit Empfängerabständen kleiner der Wellenlänge können nur noch die Signallaufzeiten und die Phasendifferenzen ausgewertet werden. Damit kennt man die Empfangsrichtung und den Abstand zum Transponder des AUV. Die Information über die Position des AUV befindet sich dann ebenfalls nur auf dem Mutterschiff und muss dem AUV wiederum per Akustikmodem mitgeteilt werden.

In der invertierten USBL-Konfiguration, trägt das AUV das USBL-Modem und ein Mutterschiff, dessen genaue GPS-Position bekannt ist, ist mit einem Akustikmodem als Transponder ausgestattet. Das AUV lokalisiert sich per USBL relativ zum Mutterschiff. Die Absolut-Positionsdaten des Mutterschiffs werden dem AUV direkt im USBL-Transpondersignal mitgeteilt wodurch das AUV die Absolut-Referenzierung durchführen kann und eine geringere Verzögerung bei der Lokalisierung besteht. Diese Konfiguration wird immer populärer, was dazu führt, dass von USBL-Lokalisierung gesprochen wird, obwohl es technisch eher invertiertes USBL wäre.

USBL wird auch als Möglichkeit untersucht, mit der mehrere Fahrzeuge im Schwarm untereinander ihre Positionen bestimmen können [Cai13].

7.1.5 Passive künstliche Landmarken

Hat man die Möglichkeit, die zu untersuchende Gegend vorab zu präparieren, wird aktuell untersucht, inwieweit man passiv codierte künstliche Landmarken für eine LBL-artige Lokalisierung verwenden kann, die sich in einer breitbandigen Sonarantwort voneinander unterscheiden [Pai13]. Dies hätte den immensen Vorteil, dass die Marken keine Energie benötigen und würde sich für Gebiete eignen, die häufig wiederkehrend inspiziert werden müssen.

7.1.6 Terrain-relative Referenzierung

Dem Thema der Referenzierung relativ zu einer Karte des Terrains ist ein eigener Abschnitt (7.3) gewidmet, vergesellschaftet mit der Aufgabenstellung, sich nicht nur in einer Karte zu lokalisieren, sondern dies gleichzeitig mit der Erstellung dieser Karte zu tun. Untersuchungen von Meduna [Med11] zeigen,

dass sich durch eine stark in ein INS integrierte Terrain-relative Referenzierung auch mit günstiger INS-Sensorik Genauigkeiten erreichen lassen, die in der Größenordnung der Genauigkeit sehr teurer INS-Systeme liegen.

7.2 Bildbasierte Sonardatenverarbeitung

Klassischerweise wurden Sidescan-Daten zeilenweise (»Sonarlinien« oder »Sonarzeilen«) von einem Thermografen aufgezeichnet. Diese Bilder wurden ursprünglich von Menschen (dem Sonaroperator) interpretiert. Beim Übergang ins digitale Zeitalter wurde die etablierte Stapelung der Sonarlinien zu einem Bild beibehalten. Sehr viele Auswerteverfahren verwenden bis heute die Erzeugung eines 2D-Pixelbilds durch Anordnen bzw. Stapeln der Sonarzeilen und wenden Methoden der Bildverarbeitung darauf an. Schon bei der frühen digitalen Bildverarbeitung von Sidescan-Daten, weisen Johnson et al. [Joh90] auf die Schwierigkeiten der Interpretation dieser Daten hin.

Bereits 1986 zeigte Chavez [Cha86] eine typische Verarbeitungskette auf analogen Sidescan-Daten des GLORIA-Systems (*Geological Long Range Inclined Asidic*²⁰) mit Slant-Range-Entzerrung (basierend auf fest gewähltem FBR), anamorpher Entzerrung, Ausgleich der Schiffsgeschwindigkeit, Entfernung des Strahlprofils durch Mittelung über viele Sonarzeilen, Filterung von Speckle-Rauschen und Filterung der Streifenbildung (engl. *striping*) durch nicht exakte Geradeausfahrt. Außerdem wurden Bild-Hochpassfilter verschiedener Größe verwendet, um Strukturen bestimmter Größe herauszuarbeiten und mit einem Gradientenfilter verglichen. Zuletzt wurde sogar mit einem von den Autoren als experimentell bezeichneten Algorithmus eine Reliefschätzung durchgeführt. Wie das geschieht, wird leider nicht detailliert ausgeführt, nur dass dunkle Bereiche Vertiefungen erzeugen.

Zur Aufbereitung der Bildinformation beschreibt Blondel in seinem Standardwerk zum Thema [Blo09] neben klassischen Bildverarbeitungsoperationen (Schärfen, Kantenfilter, Neuquantisierung) im Wesentlichen Histogrammegalierung und Speckle-Rauschfilterung, wobei für Speckle-Rauschen die ausgefeiltesten Verfahren simulierte Abkühlung (engl. *simulated annealing*) verwenden. Zur Bildinterpretation nennt er verschiedene Klassifikationsverfahren wie neuronale Netze und genetische Algorithmen.

²⁰ Im Deutschen bedeutet *asidic* »S-Gerät« und bezeichnet ein Sonar.

Die Entfernung des Rauschens auf Sonardaten wird unterschiedlich gelöst. In den einfachsten Fällen kommen Median- oder Mittelwertfilter zum Einsatz, in vielen Fällen aber auch Specklefilter, wie sie von der Radartechnik her bekannt sind, etwa in Rao et al. [Rao95] und Massonnet et al. [Mas08]. Für eine alternative Filtermethode der Specklefilterung wird eine lokale Schätzung der Grauwertverteilung durch Gauß- oder unterschiedlich parametrisierte Gamma-Statistik angenommen und Pixel mit zu großer Abweichung werden als Speckle deklariert [Blo09]. Es existiert aber noch keine allgemeine Lösung für Speckle-Entfernung, da je nach Sensor und Wellenlänge die Eigenschaften des Speckle unterschiedlich sind [Blo09]. Im Radarbereich kommt zur Specklereduktion *multilooking* zum Einsatz, bei dem mehrere Aufnahmen desselben Bereichs gewonnen werden, deren Speckle unabhängig ist. Durch Mittelung dieser Bilder wird der Einfluss von Speckle reduziert [Mas08].

Capus et al. [Cap08] zeigen Vorverarbeitungsmethoden auf Sidescan-Daten für die Visualisierung, Detektions- und Klassifikationsaufgaben. Besondere Aufmerksamkeit wird der unterschiedlichen Fahrzeugflughöhe geschenkt. Die Verfahren arbeiten auf dem gesamten Bild, nicht direkt auf der Sonarlinie. Daher stellt es kein Onlineverfahren dar, bzw. nur mit Totzeit bis das zusammengesetzte Bild groß genug für die Verarbeitung ist. Die Korrekturen sind rein bildgetrieben, es wird absichtlich keine Zusatzinformation über die Eigenbewegung oder die Sonar-Antennencharakteristik verwendet. Ebenso wird keine Kompensation für Rollbewegungen des Fahrzeugs durchgeführt. In dem Verfahren werden iterativ Korrekturfaktoren berechnet, die winkel- und entfernungsabhängige Effekte beheben sollen. Auch der Einfluss der normalerweise unbekanntem zeitabhängigen Verstärkung des Sonarsensors (siehe Abschnitt 6.3.3.6) wird geschätzt. Zuerst wird die Höhe des Sensors über Grund durch den FBR geschätzt, wobei die Informationen eines DVL mit eingebunden werden können. Für die linke und rechte Seite werden die Korrekturfaktoren für Entfernung und Höhe als gleich angenommen und durch Resampling in Winkeldarstellung und Mittelung sowie der Untersuchung der Intensitätsvarianz mit der Flughöhe gewonnen. Für die Winkelkorrektur wird keine Symmetrie angenommen, da die Antennencharakteristik bei Schräglage oder schieferm Meeresboden unterschiedlich aussieht und das Keulenmuster bei realen Systemen meist nicht exakt symmetrisch ist. Konvergenz wird erreicht, wenn für jede Fahrzeughöhe eine gleiche mitt-

lere Intensität erreicht wird. Die Autoren zeigen, dass eine Klassifikations-/Segmentierungsaufgabe mittels Co-Occurrence-Statistik deutlich an Genauigkeit gewinnt und großflächige Mosaik deutlich homogener aussehen und die durchgängige Meeresbodentextur besser sichtbar ist.

Beattie et al. [Bea95] zeigen eine Bildverbesserung von Sidescan-Bildern, die vor allem auf die Reduktion von Speckle abzielt und die Unschärfe durch die Strahlbreite reduziert. Das Verfahren nimmt vollkommen diffuse Reflexion an und formuliert ein MAP-Problem. Dies wird mit zwei Verfahren gelöst: ICM (Iterative Conditional Mode) und SR (Stochastic Relaxation) durch simuliertes Abkühlen. Die Rückstreuung wird als Rayleigh- bzw. Normalverteilt angenommen. Abhängig von den Bandbreiten der Detektionsfilter ergibt die Normalverteilung die bessere Näherung. Da die Bildrestaurationsaufgabe schlecht gestellt und unterbestimmt ist, werden regularisierende Annahmen wie Glattheitsbedingungen im Bayes'schen Sinne integriert. Da die Korrelation des Speckle gering ist, wird sie ignoriert. Dann wird eine örtliche Markov-Annahme getroffen. Das MRF wird als CGMRF (Compound Gauß Markov Random Field) ausgeführt, das auch Unstetigkeiten modellieren kann, indem Verbindungen zwischen Nachbarpixeln getrennt werden können. Der ICM-Ansatz kann in lokalen Minima hängen bleiben, während SR das globale Optimum (die wahre MAP-Schätzung) findet. Eine initiale Schätzung der Bildkanten erfolgt durch Schwellwertbildung des stark geglätteten Eingangsbildes, ein schwach geglättetes Bild beschreibt die Anfangsverteilung. Die Autoren kommen zum Schluss, dass das Ergebnis des SR-Verfahrens zwar das wahre MAP-Optimum finden kann, dabei aber extrem langsam konvergiert. Durch die sorgfältige Modellierung der Verteilung der Kanten und der Anfangsverteilung, zeigt der ICM-Ansatz sehr gute Ergebnisse bei deutlich geringerer Rechenzeit. Bei Anfangsverteilungen, die weniger nahe am Optimum sind, ist das SR-Verfahren im Vorteil. Die Autoren stellen sogar in Frage, ob das Resultat des tatsächlichen MAP-Optimums wirklich so viel besser gefällt als ein sub-optimales Ergebnis.

7.2.1 Geometrische Korrekturen und Mosaicing

Von automatischen Auswertesystemen werden die Daten von Nicht-Geradeausfahrten (z. B. Kurvenfahrten während Wendemanövern) aufgrund der Verzerrungen üblicherweise nicht verwendet. In seiner vielbeachteten Arbeit hat Cobra [Cob90; Cob92] systematisch die Einflüsse der Fahrzeugeigenbewe-

gung auf ein Sidescan-Sonarbild detailliert untersucht. Des Weiteren entwickelt er Methoden, um aus den Verzerrungen der gestapelten Sonarlinien die Bewegung des Sonarschleppfisches zu schätzen, um die Bewegungseinflüsse dann herauszurechnen und ein unverzerrtes Bild zu erhalten. Cobra versucht sogar Mehrfachaufnahmen durch die Eigenbewegung (engl. *backscanning*) zu erkennen und zu beseitigen. Der geometrische Einfluss der Eigenbewegung wird in Abschnitt 9.1 nochmals ausführlich dargestellt.

Eine Formulierung für ein ähnliches Korrekturverfahren, das die Verzerrung unter Berücksichtigung von Nick- und Gierwinkel beschreibt, ist in Beattie et al. [Bea94] gegeben. Die Sonarlinien dürfen sich für die Anwendung dieses Verfahrens auf dem Meeresboden jedoch nicht überkreuzen.

Bei der Mosaikbildung soll aus Einzelmessungen ein Bildteppich erzeugt werden. Herkömmliche Techniken versuchen durch Dopplung und Entfernen von Sonarzeilen ein brauchbares Mosaik herzustellen [Blo09]. Damit lassen sich Verzerrungen durch unterschiedliche Geschwindigkeiten anpassen und bei einseitiger Anwendung auch Verzerrungen durch Kurvenfahrt vermindern. Den Begriff der Mosaikierung verwendet Blondel speziell dafür, wenn die Teilbilder durch eine gerade Linie getrennt sind oder überlappende Pixel gemittelt werden. Als *stenciling* bezeichnet er die händische Zusammenführung durch Selektion einer Grenze zwischen den Teilbildern. Zusätzlich wird von Blondel noch *rubbersheeting* beschrieben, was man in der grafischen Datenverarbeitung Texturierung nennt, also das gummituchartige Aufsetzen der Bilddaten auf bekannte Referenzpunkte oder auf eine bathymetrische Karte. Die genannten Methoden haben rein ansichtsbasierten Charakter.

Moderne digitale Bathymetriedaten-Auswertesysteme kommerzieller Anbieter (z. B. CARIS HIPS & SIPS²¹) können die Daten gemäß der Eigenbewegung in ein zweidimensionales Raster einzeichnen und Mehrfachbeobachtungen mitteln bzw. halbtransparent übereinander gelegt anzeigen und so einen Bildteppich erzeugen.

Bei Chen et al. [Che14] wird aus Sidescan-Daten eine gitterbasierte 2D-Karte (engl. *grid map*) des Untergrunds geschätzt, die Belegungswahrscheinlichkeiten durch Objekte enthält. Jede Sonarzeile wird mit einer gleitenden Mittelung vorgefiltert und mit einem naiven Bayes-Detektor werden Objekte in der Zeile detektiert. Diese Objektdetektionen werden gemäß der Lage

²¹ <http://www.caris.com>, zuletzt abgerufen am 01.10.2015

des Fahrzeugs zum Aufnahmezeitpunkt zusammen mit der Unsicherheit durch die Strahlaufweitung für die jeweilige Aufnahmeposition erweitert und in der Karte eingetragen.

7.2.2 Bildfusion

Dass sich durch Aufnahmen von mehreren Überfahrten aus unterschiedlichen Blickwinkeln mit anschließender Datenfusion rauschbedingte Fehler in Sidescan-Daten verringern lassen, wird bereits bei Langer et al. [Lan91] beschrieben.

In [Coi04] wird ein Fusionsverfahren für Sidescan-Sonaransichten vorgestellt. Die Bildregistrierung erfolgt durch ein Offline-SLAM-Verfahren, das auf einem RTS-Kalman-Smoother²² (Rauch-Tung-Striebel) basiert. Die Datenassoziation geschieht per Hand, sie sei aber auch automatisch möglich. Es wird nicht gesagt, auf welche Weise dies geschieht, aber vermutlich durch das Verfahren von Tena Ruiz et al. [Ten03] aus der gleichen Forschungsgruppe. Die Bildfusion erfolgt nicht durch Überblendung oder Mittelung der Einzelbilder, sondern durch eine Modifikation der Gabor-Fusion im Frequenzbereich, die das Rauschen weniger hervorheben soll. Ob und wie unterschiedlicher Schattenwurf von Objekten behandelt wird, wird nicht beschrieben.

In Reed et al. [Ree05; Ree06] wird eine Bildfusion mittels MRFs auf überlappenden Bereichen vorklassifizierter Sidescan-Bilder durchgeführt. Zu Klassifikation werden mithilfe von eindimensionalen Spektren auf Frequenzbändern Merkmale durch das Verhältnis verschiedener Bänder erzeugt und die Bilder durch SLAM-Verfahren von Tena Ruiz et al. [Ten03; Rui04] zueinander registriert. Diese SLAM-Verfahren werden später in Abschnitt 7.3.1 erläutert. Reed et al. [Ree06] verwenden dann zwei verschiedene Methoden auf MRFs, um überlappende Bildbereiche zu fusionieren: Ein abstimmungs-basiertes Verfahren falls die Unsicherheit zu den Daten unbekannt ist, und ein Verfahren, das die Zuverlässigkeit der Daten probabilistisch modelliert. Die Autoren haben gezeigt, dass das Verfahren kleine Löcher im zusammengesetzten

²² Kalman-Smoothing bezeichnet eine Kalman-Filterung, die auch zukünftige Daten in einen Schätzvorgang mit einbezieht. Dadurch wird es entweder als Nachbereitungsverfahren eingesetzt oder man schätzt mit zeitlichem Versatz, so dass für den Schätzzeitpunkt zukünftige Messungen existieren.

Segmentierungs-Mosaik schließt und eine konsistente, fusionierte Karte der Sedimenttypen erzeugt.

Daniel et al. [Dan98] segmentieren zwei reale Sidescan-Bilder in Echo, Schatten und normale Oberflächenantwort. Dann wird versucht, alle Echo-Schatten-Paare in beiden Sonarbildern zu identifizieren. Diese werden einander nach Auswertung eines Distanzmaßes rekursiv mit Entscheidungsbäumen zugeordnet. Das Verfahren wird noch über adaptive Schwellwerte und Vereinigung von Schattenbereichen erweitert, weil in Teile zerfallene Schatten ein Problem der Methode sind.

Laanaya et al. [Laa09] zeigen Methoden zur Bildfusion, die simulierte Sidescan-Aufnahmen aus mehrfachen Überfahrten über ein Gebiet verwenden. Ziel ist die Klassifikation des Sedimenttyps mithilfe von Belief-Funktionen. Die simulierten Grundwahrheits-Daten werden für jede Seite des Sonars aus 13 quadratischen Kacheln der Kantenlänge 10m erzeugt, bei deren Fusion Positionsunsicherheiten mitberücksichtigt werden. Die Ergebnisse der Fusion durch Belief-Funktionen sind laut den Autoren deutlich besser als die Fusion durch Mehrheitsentscheidung.

7.2.3 Merkmalsverfolgung (Tracking)

Verfahren zur automatisierten Bildauswertung sind oft von militärischen Fragestellungen wie Minensuche, Objektklassifikation oder Zielverfolgung (engl. *target tracking*) getrieben. Inzwischen werden solche Ziele häufig durch automatisierte Systeme detektiert, die an Bord von AUVs in Echtzeit laufen [Set13]. Dies geschieht beispielsweise durch Integralbildansätze [Wil11]. Hier soll eine Auswahl an sonarbasierten Verfahren zur Merkmalsverfolgung vorgestellt werden. Diese arbeiten jedoch auf Daten eines FLS und sind aufgrund der hohen Sensorwiederholrate daher nicht direkt auf Sidescan-Sonardaten anwendbar, auch wenn das Aufnahmeprinzip vergleichbar ist.

Clark et al. [Cla07] zeigen ein Mehrziel-Tracking in FLS-Daten. Sie beschreiben zwei Algorithmen: Ein echtzeitfähiger Algorithmus, der Nächste-Nachbar-Datenassoziation auf mehrere Einzelziel-Filter anwendet und einen zweiten Algorithmus, der mit einer Mehrziel-Verfolgung arbeitet und eine Mehrziel-Datenassoziation durchführt. Der erste Algorithmus führt noch eine Vorverarbeitung durch, in der vorhergesagt wird, wo die Objekte in etwa auftauchen werden, um die Datenmenge zu reduzieren. Der zweite Algorithmus

wendet ein partikelbasiertes PHD-Filter (engl. *probability hypothesis density*), das die Anzahl der Ziele und ihre Positionen ohne feste Datenassoziation schätzt. An Bildverarbeitungsmethoden werden zur Merkmalsextraktion nach einer Segmentierung adaptive Schwellwerte verwendet. Die Verfahren werden auf simulierten und realen Daten ausgewertet. Als Simulator für die FLS-Daten wird der Sonarsimulator von Bell (Abschnitt 7.7.2.1) verwendet, der ursprünglich zur Erzeugung von Sidescan-Daten konzipiert wurde. Die Daten haben laut den Autoren relativ hohes *SNR*. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass beide Verfahren geeignet sind, das PHD-Filter aber auch bei einem höheren Clutter-Anteil immer noch gut funktionieren sollte.

In Folkesson et al. [Fol07] wird eine Merkmalsverfolgung auf Daten eines FLS gezeigt. Die Autoren wählen Kandidatenpunkte im Bild aus, die in der Zeit weiter präzisiert und bei genügend vielen konsistenten Beobachtungen als stabiles Merkmal verwendet werden. Folkesson et al. verwenden für die Merkmale eine bogenförmige Parametrisierung der Unsicherheit, da die Unsicherheit in kartesischen Koordinaten nicht gaußsch verteilt ist. Sie stellen fest, dass sich eine Gaußverteilung auch für die Verteilung der Winkel nicht eignet. Sie führen eine kubische Transformationen auf dem Winkelmerkmal ein, und nehmen für die Unsicherheit des transformierten Merkmals eine Gauß'sche Verteilung an. Dadurch ist die Verteilung um das ursprüngliche Merkmal so abgeflacht, dass die Unsicherheit über einen größeren Bereich beinahe konstant ist. Die Merkmalsrepräsentation und der Schätzer können dadurch effektiv mit hochgradig nicht-gaußschen Messungen umgehen und waren gut genug, um in einer SLAM-Anwendung eingesetzt werden zu können. Bei den Versuchen wurden Reflektoren eingesetzt, die ein Minenfeld simulieren sollen. Das Fahrzeug sollte sich zu einer bekannten Merkmalskarte mit Minenpositionen lokalisieren, die a priori aus Sidescan-Daten gewonnen wurde.

Zusammenfassend kann man festhalten, dass die verwendeten Trackingverfahren von der Bilverarbeitung her bekannte Verfahren sind, die gegebenenfalls leicht modifiziert wurden und eine hohe Sensorwiederholrate benötigen.

7.2.4 Klassifizierung

Bodenklassifizierung

In Fakiris et al. [Fak13] wird ein neues Komplexitätsmaß und ein Anisotropiemaß für Sidescan-Bilder vorgestellt, um bezüglich ATR/MCM-Fragestellungen Gebiete in leichte und schwierigere Bereiche einteilen zu können.

Durch die Verwendung einer Ganzzahl-Haar-Filterbank, die auch rotierte Varianten enthält, werden auf Integral-Bildern Merkmale für 12 Rotationsrichtungen unter Berücksichtigung der Anamorphie der Daten berechnet. Als Anisotropiemaß wird der quadrierte Variationskoeffizient $(\sigma/\mu)^2$ der Filterantworten über die Richtungen verwendet. Das Komplexitätsmaß wird zu μ^2/σ definiert. Im Ergebnis können die Autoren Bereiche mit Sandwellen sehr gut abgrenzen und Bereiche identifizieren, die Clutter enthalten.

Objektklassifizierung

In [Lan09] werden Richtwerte für Auflösungen gegeben, ab denen verschiedene Eigenschaften eines Objekts aus Sonardaten bestimmt werden können.

Bell et al. [Bel02a] führen zur Extraktion und Klassifikation von Objekten auf Sidescan-Daten eine Objektdetektion mittels eines MRF durch. Dazu werden im Bild Schlaglicht- und Schattenbereiche von der normalen Bodenrückstreuung mithilfe von kooperierenden statistischen Snakes segmentiert. Dann werden zwei Methoden präsentiert: Eine Methode verwendet mehrere Bilder und erzeugt aus dem Schnitt der Rückprojektionen ein Volumen, das das Objekt darstellt. Dieses Objekt kann nun vom Operator bewertet werden oder es wird verwendet, um synthetische Ansichten zu generieren. Die zweite Methode führt direkt eine Klassifikation auf einem Einzelbild durch. Dazu wird ein iterativer MCMC-Ansatz (*Markov Chain Monte Carlo*) verwendet. Hier wird der Schattenwurf mit einer Reihe von modellbasierten synthetischen Bildern verglichen, die von einem wahrscheinlichen Objekttyp stammen. Am Ende der Anpassung sind die bestpassenden Modellparameter gefunden und damit die Form des Objekts.

Durch hochauflösende Sonare kommen immer mehr Klassifikationsverfahren aus dem optischen Bereich auch für Sonardaten in Betracht, Petillot [Pet14] nennt etwa Boosting-Ansätze. Diese kommen auch in [Köh13] zur Minendetektion zum Einsatz. Dort wird Minendetektion mithilfe von Templates in Sidescan-Daten durchgeführt. Dies geschieht der Effizienz halber auf Integralbildern. Zur Klassifikation wird eine geboostete Klassifikator-Kaskade verwendet. Neu ist die Einführung von dreieckigen und parallelogrammförmigen Templates, die stärker den Bildern von Minen entsprechen.

Ebenfalls zur Minendetektion schlägt Williams et al. [Wil13] vor, die Umgebungseinflüsse des Objekts mit in den Objektklassifikator als Meta-Merkmal aufzunehmen. Die genannten Umwelteinflüsse werden durch die bereits beschriebenen Komplexitäts- und das Anisotropiemaße aus [Fak13] repräsen-

tiert. Es werden Maßnahmen getroffen, um zu verhindern, dass jeder Klassifikator nur das Objekt lernt und damit die Umgebungseinflüsse ohne Einfluss wären. Erzielt wird eine erheblich verbesserte Minen-Detektionsleistung. Im Gegensatz zu den Trackingverfahren werden die Klassifikationsverfahren eng auf den Unterwasser-Anwendungsbereich zugeschnitten und unterscheiden sich daher deutlich von Lösungen der Landrobotik.

7.3 SLAM in Unterwasser-Anwendungen

SLAM ist auch als *concurrent mapping and localization* (CML) bekannt. In reinen Lokalisierungsfragestellungen taucht oft auch der Begriff *terrain-relative navigation* (TRN) auf. Einen Überblick über allgemeine SLAM-Verfahren geben Bailey in [Dur06a; Dur06b] oder Thrun et al. [Thr05; Mon07]. Über die Arbeiten zu SLAM-Verfahren in Unterwasser-Anwendungen ist eine umfangreiche Übersichtsliste der Arbeiten bis 2007 mit jeweiligem Sensortyp, Landmarkentyp, Filtertyp, Kartentyp, Featureextraktion, Datenassoziation und Vorhandensein von Ground truth in der Arbeit von Ribas [Rib08] zu finden. Eine Übersicht über Unterwasser-Navigationssensorik und Unterwasser-Navigationsalgorithmen ist in [Kin06] zu finden.

Obwohl große Bereiche des Meeresbodens laut Fairfield et al. [Fai08] arm an Merkmalen sind, befinden sich dort, wo AUVs eingesetzt werden, normalerweise hinreichend komplexe Unterwasserstrukturen, die eine Wiedererkennung in SLAM-Algorithmen ermöglichen. Die Geometrie dieser Strukturen kann durch ein reines 2D-Modell des Meeresbodens aber nicht adäquat wiedergegeben werden, weswegen es für diese Anwendungen unangebracht ist [Joh10]. Allerdings ist ein vollständiges 3D-Modell oft auch nicht unbedingt notwendig. Eine 2,5D-Darstellung als Höhenkarte ist meistens ausreichend [Fai08].

Die für diese Arbeit relevanten Verfahren werden nun detaillierter vorgestellt, wobei nachfolgend Sidescan-basierte SLAM-Verfahren aus der Literatur vorgestellt werden.

7.3.1 SLAM-Verfahren auf Sidescan-Sonardaten

Engel et al. zeigen in [Eng08] ein SLAM-Verfahren mit Sidescan-Daten. Das Verfahren ist bildbasiert und verwendet Bildsegmentierung und Objektde-

tektion. Das Bild wird mittels ICM in drei Klassen von Pixeln segmentiert: Schatten, Hintergrund und Ziel(-Objekt). Es werden nur Objekte mit zugehörigem Schattenwurf betrachtet. Als Merkmale werden die Objektposition sowie charakteristische Merkmale wie z. B. die Objektgröße verwendet. Für die Fahrzeugeigenbewegungsschätzung wird ein AUV-Fahrzeugmodell verwendet, das per Error-State EKF arbeitet und durch ein DVL gestützt wird. Die Landmarken werden als unbeweglich angenommen. Wie bei EKF-SLAM üblich, bringt die Hinzunahme von Landmarken eine quadratische Skalierung des Rechenaufwands mit sich. Das Verfahren assoziiert Daten nicht einzeln, sondern bündelt mehrere Merkmale und versucht eine gemeinsame Datenassoziation mit Methoden der gegenseitigen Verträglichkeit (engl. *joint compatibility*). Dadurch (und durch die Bildverarbeitungsschritte) muss das EKF verzögert aktualisiert werden. Problematisch daran ist laut den Autoren jedoch die Zwischenspeicherung der Daten: Normalerweise geht der Beobachtungsschritt des EKF davon aus, dass die Kalman-Innovation sofort verarbeitet wird. Wartet man nun länger bis zur Entscheidung, dass ein Merkmal als Landmarke hinzugefügt wird, muss man sämtliche Updateschritte des Filters seit der ersten gültigen Beobachtung des Merkmals nachholen. Die ganzen dafür notwendigen Daten müssen im Speicher vorgehalten werden. Um Speicher zu sparen (aber dafür höheren Rechenaufwand zu haben), können die Zustands- und Kovarianzschätzungen aus der aktuellen Schätzung auch zurückgerechnet werden. Evaluiert wurden die Verfahren mit einem nicht öffentlichen Simulator »SoSim« von Atlas Elektronik, der 3D-Raytracing verwendet und kohärenten Backscatter physikalisch modelliert (siehe Abschnitt 7.7.2.7).

In Tena Ruiz et al. [Ten03] wird EKF-basiertes SLAM auf Sidescan-Daten in natürlicher Umgebung gezeigt. Die Merkmalsextraktion und Assoziation erfolgt wie auch in Ruiz et al. [Rui04] manuell. In Ruiz et al. [Rui03] wird die Extraktion und Assoziation dann automatisch durchgeführt, indem mit MRFs in Verbindung mit kooperativen Snakes Schlaglicht-Schatten-Paare gefunden werden. Die Datenassoziation verwendet nicht nur die nächsten Nachbarn, sondern den *Joint Compatibility Test* (JCT) aus Neira et al. [Nei01], der die Maximalanzahl an Merkmalspaaren findet, die die Gesamtkonsistenz der Karte bewahrt. In Ruiz et al. [Rui04] wird ein vorwärtsgerichtetes Sonar mit einem Sidescan-Sonar verglichen. Das FLS ist in der Auswertung doppelt so gut wie ein Sidescan-Sonar, da 23-mal mehr Beobachtungen gemacht

werden. Reine Koppelnavigation (engl. *dead reckoning*) ist jedoch noch schlechter als die Stützung durch Sidescan-Sonardaten. Laut den Autoren ist zusätzlich Kalman-Smoothing über einen Rauch-Tung-Striebel-Smoother anzuraten, was entweder offline-Datenverarbeitung oder zumindest zeitlich versetzte Datenverarbeitung erforderlich macht. Die genannten Verfahren modellieren die Fahrzeugbewegung nur in einer Ebene durch zweidimensionale Koordinaten mit Richtungsvektor.

Fallon et al. [Fal11; Fal13b] zeigen ebenfalls SLAM mit Sidescan-Daten. Diese werden durch die bekannte AUV Flughöhe in die Bodenebene (engl. *ground range*) projiziert. Aufgrund der schwierigen Datenassoziation wird diese manuell durchgeführt, soll aber zukünftig wie in [Rui03] automatisch passieren. Die Autoren halten sogar aktuelle Methoden des ansichtsbasierten Matchings wie z. B. über FAB-MAP von Cummins [Cum09] für zu fehleranfällig auf akustischen Daten. Die Autoren machen die Annahme eines prinzipiell ebenen Meeresbodens, was sie in ihren Experimenten mit einem Gradienten von nur 0,5% auch rechtfertigen können.

In Aulinas et al. [Aul11a] wird eine neue Subkartenfusionsstrategie für SLAM-Verfahren vorgestellt und auf verschiedenen Sensordaten untersucht, hauptsächlich für Kameradaten aber auch für Sidescan-Daten. Als Ergebnis wurden auch bei Sidescan-Daten konsistente Karten und genaue Fahrzeug-schätzungen erzielt. Die Datenassoziation wurde per Hand durchgeführt. Die Assoziation mit dem JCT/JCBB Verfahren ergab prinzipiell die gleichen Assoziationen, war aber empfindlich was die Wahl der Rauschparameter des Zustandsschätzers angeht.

Die Aufgabenstellung, die die vorliegende Arbeit motiviert hat, ist den bisher genannten Arbeiten ähnlich. Die Tatsache, dass sich die Koppelnavigation durch Sidescan-Sonardaten verbessern lässt, wird auch von diesen Autoren betont. Allerdings findet die Datenverarbeitung rein bildbasiert (wenn auch aufwändig) statt. Dem Entstehungsprozess der Daten wird nur dadurch Rechnung getragen, dass eine helle Region und eine Schattenregion bei Objekten nebeneinander liegend vorkommen müssen.

7.3.2 SLAM-Verfahren auf Daten rotierender bildgebender Sonare

Mehr Arbeiten existieren für Daten von bildgebenden Sonaren mit höherer Wiederholrate wie MSIS oder FLS, wovon hier einige genannt werden sollen.

Die besonders bekannte Arbeit von Ribas et al. [Rib08] zeigt Datenverarbeitung für ein MSIS. Durch die vergleichsweise hohe Wiederholrate und die Rundumsicht werden Objekte bereits bei einer Vorbeifahrt mehrmals aufgenommen. Das Verfahren wurde ursprünglich für menschlich strukturierte Umgebungen entwickelt. Mittels einer Hough-Transformation werden Linienstrukturen (etwa von Kaimauern) im Sonarbild gesucht. Es werden zudem Subkarten gebildet und sichergestellt, dass diese bedingt unabhängig bleiben, damit eine konsistente Fusion zu einer globalen Karte erreicht wird [Pin07]. He et al. [He09] versuchen auf den gleichen MSIS-Daten von Ribas et al. [Rib08] statt mit Linienmerkmalen mit bildbasierten Punktmerkmalen zu arbeiten, um das Verfahren auf beliebige Umgebungen zu erweitern. Über ein Schwellwertverfahren wird versucht, möglichst schnell zu Punktmerkmalen zu gelangen, mit denen dann klassische EKF-SLAM-Methoden implementiert werden. Das Verfahren von Ribas [Rib08] wurde später von Mallios et al. und Zandara et al. [Mal10; Zan13] auf beliebige Umgebungen erweitert, indem Scan-Matching (u. a. durch den *iterative closest point*-Algorithmus, ICP) auf den Sonardaten durchgeführt wird.

Padial et al. [Pad13; Pad14] zeigen Methoden zur ROV-Lokalisierung mittels eines MSIS in einer a-priori bekannten bathymetrischen Karte. Sie erzeugen synthetische MSIS-Karten mit erwartetem Schattenwurf für alle Hypothesen der aktuellen Position des ROV. Die Messung wird durch einen Schwellwert in Schatten/Nicht-Schatten eingeteilt und über morphologisches Schließen von den Speckle-Artefakten befreit. Zusätzlich wird dem ROV-Operator auch ein Region-Growing-Algorithmus angeboten, für den er aber händisch Saatpunkte setzen muss. Um die Sichtbarkeit eines Terrainpunktes zu bestimmen, verwenden die Autoren eine Formulierung, die prüft, ob ein Punkt ober- oder unterhalb der Sichtlinie aller näher am Nadir liegenden Punkte liegt. Die Autoren nennen dieses Verfahren *differential height*.

In [Luo10] wird anhand von Daten eines bildgebenden MSIS ein Vergleich zwischen zwei unterschiedlichen Datenassoziationsverfahren durchgeführt: *Individual Compatibility Nearest Neighbor* (ICNN) und *Joint Compatibility Branch and Bound* (JCBB), was auch von Tena Ruiz et al. in Abschnitt 7.3.1

verwendet wird. Die Autoren kommen zu dem Schluss dass ICNN nicht so gut funktioniert, JCBB hingegen eigentlich zu langsam sei. Daher schlagen sie eine Beschleunigung für JCBB vor, ohne zuviel Genauigkeit zu verlieren.

Williams et al. [Wil01] verwenden nicht Merkmale aus der natürlichen Umgebung, sondern künstliche, im Meeresboden verankerte Sonarreflektoren, die durch die punktförmige Sonarantwort als Punktmarke dienen. Diese Punktmarken werden in einem MSIS-Bild gesucht. Dies ist ein mehrstufiger Prozess: Zuerst werden besonders helle Bereiche extrahiert und geclustert. Wenn die Tiefe der Punkte im Cluster konsistent ist, wird für das Cluster ein Punktmerkmal als Kandidat für eine Punktmarke erzeugt. Dieses wird mit bereits bestehenden Merkmalen in der Karte durch den Mahalanobis-Abstand verglichen. Gibt es eine eindeutige Assoziation wird es ins EKF aufgenommen. Falls es mehrere mögliche Treffer gibt, wird es verworfen. Existiert kein Treffer, wird es mit der Kandidatenliste verglichen. Gibt es eine Übereinstimmung, wird dem Kandidaten eine Stimme gegeben. Ansonsten wird es zur Kandidatenliste hinzugefügt. Dort sammelt es Stimmen und wird bei genügend Stimmen ins EKF aufgenommen, anderenfalls nach einer Weile als nicht stabil verworfen. Zukünftig wollen die Autoren auch Merkmale aus unstrukturiertem natürlichem Terrain verwenden.

7.3.3 SLAM-Verfahren auf Daten vorwärts schauender bildgebender Sonare

Die Aufgabe, die Navigation eines AUV durch Umgebungsmerkmale zu stützen, findet sich bereits bei [Car98] für den Fall eines FLS. Das verwendete FLS hat zwar eine zweidimensionale Transducer-Anordnung, der Schall wird aber auf lediglich eine Elevationsebene fokussiert. Als Ergebnis bleibt ein Öffnungswinkel von ca. 7° vertikal und ca. 4° horizontal mit einer Auflösung von 128 Strahlen. Das Sonar hat eine Bandbreite von etwa 8 kHz bei einer Arbeitsfrequenz von 87 kHz. Die Autoren wenden Verfahren der morphologischen Bildverarbeitung zur Weiterverarbeitung an. Schließlich werden geometrische Merkmale gebildet (z. B. Umfang-zu-Fläche-Verhältnis), anhand derer die Datenassoziation erfolgt. Für jedes Objekt wird ein entkoppeltes EKF verwendet, um den Rechenaufwand gering zu halten.

In [Wal08] zeigen Walter et al. SLAM-Verfahren auf Daten eines DIDSON-Sonars (siehe Abschnitt 6.3.6). Dies geschieht merkmalsbasiert in einem

dünn besetzten Informationsfilter ohne explizite 3D-Rekonstruktion. Um von den bildbasiert gewonnenen Merkmalen zu einem 3D-Punkt zu gelangen wird zusätzlich ein im Nickwinkel verstellbares DVL verwendet, aus dessen Tiefenwerten dann die z -Komponente geschätzt wird.

In [Fal13a] zeigen Fallon et al. für eine MCM-Anwendung eine Kombination von Sidescan- und FLS-Daten. Zunächst wird mit einem hochwertigen und sehr genauen AUV eine Sidescan-Kartierung (Mosaik) eines Interessengebiets durchgeführt. Auf der erhaltenen Karte werden interessante Merkmale (Minen) von menschlichen Begutachtern ausgewählt und damit eine a-priori-Merkmalsskarte erzeugt. Dann soll sich ein kostengünstiges AUV, ausgestattet mit einem FLS, auf dieser Karte mithilfe eines *square root smoother* SLAM-Verfahrens lokalisieren. Zur Vorverarbeitung werden auf dem FLS-Bild Verfahren der Linienextraktion, Filterung und Segmentierung angewendet. Außerdem wird ein für die Flughöhe spezifisches Durchschnittshintergrundbild abgezogen, um die Merkmale klarer herausarbeiten zu können. Als Merkmal gilt eine helle Region mit sich anschließender Schattenregion. Neu sei laut den Autoren zudem, dass bei der Lokalisierung auch negative Information aus der a-priori-Karte verwendet wird, d. h. wenn ein erwartetes Merkmal nicht beobachtet wird. Durch regelmäßige Neu-Evaluierung der Linearisierungspunkte des SLAM-Verfahrens erhalten sie eine konsistente Karte, wobei das Verfahren von der Rechenzeit her echtzeitfähig bleibt. Für die Lokalisierungsaufgabe wird ein günstiges AUV gewählt, weil es bei der Neutralisation der Mine beschädigt werden kann.

In Marani et al. [Mar10] wird folgende Aufgabe für ein AUV untersucht: Eine rechteckige Landeplattform soll mithilfe von DIDSON-Sonardaten von einem AUV gefunden und angesteuert werden. Dazu wird per Raytracing ein sehr einfaches Modell der Datenaufnahme erstellt und künstliche Bilder des Rechtecks mit seinem Schattenwurf erzeugt. Diese werden dann per *matched filter* im Ortsbereich im Sonarbild gesucht. Durch eine iterative Vorgehensweise unter Rückkopplung der geschätzten Transformation in den Raytracingschritt kann auch die Höhenkoordinate der Landeplattform geschätzt werden.

Inspektion an Schiffsrümpfen

Arbeiten zur Inspektion an Schiffsrümpfen erfreuen sich reger Forschungstätigkeit, weswegen auch Arbeiten aus diesem Bereich vorgestellt werden sollen:

Eine aktuelle Methode von Ozog [Ozo15] beschreibt 3D-Mosaikerzeugung zur Schiffsrumpfspektion durch ein FLS im Zusammenspiel mit einem in Richtung des FLS blickenden DVL, das Geschwindigkeitsdaten relativ zum Rumpf angibt. Die 4 Strahlen des DVL werden zusätzlich noch als extrem grob aufgelöstes Multibeam-Sonar betrachtet. Die Punkte, die durch die Abstandswerte der DVL Strahlen definiert werden, liefern eine grobe Punktwolke des Schiffsrumpfs, die linear interpoliert wird. Durch ein für diesen Zweck entworfenes *piecewise planar* SLAM-Verfahren, bei dem die Normalen aufeinanderfolgender Aufnahmen ähnlich sein müssen (aber nicht so, dass die Form des Schiffsrumpfs verloren geht), wird die Eigenbewegung korrigiert. Nach einer Verfeinerung des Dreiecksnetzes werden die Eckpunkte des Netzes in die FLS-Sonarbilder projiziert. Dies geschieht nicht durch eine geschlossene Lösung, sondern näherungsweise durch eine Voxel-Diskretisierung des kompletten Sichtkegelstumpfs des FLS. Dann wird für jede Fläche des Netzes eine feste Anzahl solcher FLS-Bilder überblendet, die nach einer Qualitätsheuristik gute Qualität bieten.

VanMiddlesworth beschreibt in [Van15; Van14] ein Inspektionsverfahren für teilweise strukturierte Umgebungen wie z.B. Schiffshüllen, Offshore-Plattformen, Pipelines und Häfen. In den genannten Arbeiten wird die Inspektion einer Schiffsschraube durch ein AUV vorgestellt. Die Sonardaten werden mit einem DIDSON-Sonar gewonnen, das zu einem fächerförmigen profilbildenden Nahbereichs-Sonar umfunktioniert wird, indem über einen Winkelbereich von $22^\circ \times 1^\circ$ 96 Strahlen ausgesendet werden. Die Entfernungsauflösung der Sonarbilder ist in etwa 1 cm bei einer Arbeitsentfernung von 1–6 Metern. Das Sonar ist zusätzlich schwenkbar, um mit dem Fächer ein Gebiet überstreichen zu können. Nach einer Medianfilterung werden die höchsten Intensitätswerte pro Strahl extrahiert und der zeitlich erste (also räumlich nächste) als Entfernungswert verwendet.

Die Daten des Sonars werden dann über kurze Zeiträume zu Subkarten zusammengefasst, für die davon ausgegangen wird, dass die Koppelnavigation noch keinen nennenswerten Fehler erreicht hat. Wird mit dem ein Schwenk vollführt, wird der gesamte Schwenk als Subkarte betrachtet. In den Subkarten werden dann Ausreißer gefiltert, wenn die durchschnittliche Distanz zu den k nächsten Nachbarn größer ist als die Standardabweichung innerhalb der Nachbarn. Anschließend wird die Punktdichte der Subkarte vereinheitlicht. Danach wird für jeden Punkt durch ein least-squares-Verfahren

eine polynomiale Oberfläche durch alle Punkte in einem bestimmten Radius gelegt. Der Punkt wird auf diese Oberfläche projiziert und mit der Normalen in der Subkarte für die Ausrichtung im SLAM-Verfahren gespeichert und die unverarbeitete Subkarte wird für die Zurückprojektion in die finale Karte gespeichert. Die SLAM-Formulierung verwendet einen Posengraph für die Subkarten, wobei die Subkarten durch ICP aneinander ausgerichtet werden. Das System ist laut den Autoren in Echtzeit lauffähig.

Hurtós et al. [Hur12] betreiben ebenfalls zur Schiffsinspektion Mosaikierung (jedoch auf MSIS-Daten) mit einer fourierbasierten Phasenkorrelationsmethode. Normalerweise gibt der Peak in der Phasenkorrelationsmatrix die Verschiebung des Bildes an. Um die Rotation und Skalierung zu bekommen wird der logarithmische polarkoordinatentransformierte Betrag des Fourierpektrums als Eingangsgröße für die Phasenkorrelation genutzt und daraus der Rotationswinkel abgeleitet. Da die Sonarbilder keine unterschiedliche Skalierung besitzen, werden die Ursprungsbilder mit dem gewonnenen Winkel rotiert und der Peak in der klassischen Phasenkorrelation gesucht, um die Verschiebung zu finden. Durch Lösen eines least-squares Problems basierend auf den Bedingungen zwischen aufeinanderfolgenden und nicht-aufeinanderfolgenden Bildern wird ein global konsistentes Mosaik erzeugt. Die Autoren bemerken ferner, dass die vorgestellten Bedingungen über posenbasierte Graphen auch in echtzeitfähigen Systemen zur Eigenbewegungsschätzung (z. B. im iSAM SLAM-Algorithmus [Kae08]) verwendbar sein könnten. Als Startpunkte für die least-squares-Lösung verwenden die Autoren die Information aus den Navigationsdaten statt aus den konkatenierten Verschiebungen der Mosaik, da dies genauer sei.

7.3.4 SLAM-Verfahren auf anderen Sonardaten

Die Daten eines MBES (Abschnitt 6.3.11) als Daten eines profilbildenden Sonars unterscheiden sich grundlegend vom bildgebenden Sidescan-Sonar und ähneln eher der Verarbeitung von Zeilen-Laserscanner-Daten in der Landrobotik. Das ist sicherlich ein Grund, warum es viele Forschungsarbeiten zu SLAM-Verfahren auf Multibeam-Daten gibt. Eine Auswahl wird im Folgenden vorgestellt:

In einer reinen Lokalisierungsfragestellung wird von McLaren et al. [McL96] ein Navigationssystem für die Inspektion von bekannten Unterwasserstrukturen vorgeschlagen. Das Verfahren schränkt sich auf die Erkennung zylindri-

scher Säulen von bekannten Unterwasserstrukturen ein. Es wird ein vorwärts schauendes bildgebendes *sector scanning* Sonar mit einem Öffnungswinkel von $1,7^\circ$ bei 1 MHz verwendet, aus dem durch Erkennung des ersten Echos und nachfolgender Segmentierung Abstandswerte extrahiert werden. D. h. , es stellt im Ergebnis dann eine Art scannendes Multibeam-Sonar dar. Auf jeden im Sonarbild gefundenen Cluster wird eine Schnittellipse eingepasst und zum CAD-Modell der Unterwasserstruktur referenziert. Damit wird die 6D-Pose des Fahrzeugs geschätzt.

In [Rom05] zeigen Roman et al. einen merkmalsfreien Ansatz, um Karten, die aus Multibeam-Sonardaten gewonnen wurden, mithilfe von SLAM-Verfahren zu verbessern. Dazu werden kleine Oberflächenstücke (engl. *patches*) erzeugt, die als Subkarten in einer globalen Karte zueinander referenziert werden. Es muss eine Balance gefunden werden, die Karten klein genug zu halten, dass der Fehler durch die Koppelnavigation innerhalb der Subkarte nicht ins Gewicht fällt, aber auch groß genug, dass die Referenzierung zu anderen Subkarten gelingt. Die Kartierung wird durch ein *delayed state* EKF durchgeführt, bei dem die Bedingungen zwischen Zuständen verzögert eingebracht werden und die Linearisierung daher auch verzögert stattfindet. Die Referenzierung der Subkarten zueinander erfolgt nach Auswahl der passenden Subkarte durch den ICP-Algorithmus. Die Vorverarbeitung der Sonardaten unterscheidet sich nicht wesentlich von gängigen Filtermethoden für Entfernungswerte aus Laserscannern.

Die Arbeiten von Fairfield [Fai09; Fai07; Fai06; Fai05] beschäftigen sich mit SLAM auf Multibeam-Sonardaten. Allerdings verwendet er ein Gefährt mit einem nicht-klassischen Multibeam-Sonar: Die Wandler sind um das Fahrzeug herum auf einer gedachten Kugeloberfläche in Großkreisen angeordnet: äquatorial und entlang einiger Meridiane. Auf diese Weise misst das Fahrzeug in alle Raumrichtungen gleichzeitig, wenn auch mit geringerer Auflösung als bei einem traditionellen Multibeam-Sonar. Der Anlass für diese Konstruktion war die Vermessung von labyrinthartig verzweigten Unterwasser-Karsthöhlen, sog. Cenoten, in Mexiko. Als Repräsentation der Daten werden dreidimensionale *evidence grids* verwendet, die ein einfaches MRF darstellen. Die Belegungen der Gitterzellen sind in einer äußerst effizienten neuen Octree-Datenstruktur (*deferred reference count octree*) abgelegt, die sich aufgrund des geringen Ressourcenbedarfs auch für Partikelfilter eignet. Durch ein SLAM-Verfahren, das Subkarten verwendet, konnte eine

3D-Rekonstruktion der Cenoten erreicht werden. Zusammen mit Fairfield hat Kantor Fortschritte bei der Fusion der Messungen und bei der Filterung der Fahrzeugeigenbewegung erzielt [Kan07]: Die Karte wird ähnlich zu FastSLAM [Mon07] mittels eines rao-blackwellisierten Partikelfilters geschätzt. Durch ein separates Kalmanfilter wird der Bias der IMU geschätzt, solange das schräg eingebaute DVL Kontakt zu einer Wand hat.

In [Fai08] zeigt Fairfield ein SLAM- und aktives Lokalisierungsverfahren mittels MBES-Daten (aus normaler Sensoranordnung) auf einer a priori bekannten, fein aufgelösten (1 m) bathymetrischen Karte, ebenfalls repräsentiert als *evidence grid*. Zum Aufbau der Karte wird obiger partikelfilterbasierter SLAM-Algorithmus mit der optimierten Octree-Datenstruktur verwendet. Spannend ist der aktive Lokalisierungsteil: Für jedes Partikel des Filters werden künstliche MBES-Messungen per Raycasting simuliert. Die Partikel werden dabei derart gewählt, dass möglichst unterschiedliche Messungen entstehen und das Filter dadurch schon nach kurzer Zeit nicht passende Partikel verwerfen kann und seine Unsicherheit besonders schnell reduziert. Nach wenigen Sekunden ist Konvergenz erreicht und die Position bekannt. Es wurde auch untersucht, ob auch nur die vier Strahlen eines DVL für die Lokalisierung reichen würden, und auch hier konvergiert die Schätzung zur richtigen Lösung, allerdings recht langsam.

Dektor et al. [Dek12] beheben das Problem bei derartigen Terrain-relativen Lokalisierungsverfahren, dass das Filter auf merkmalsarmen Regionen zu sicher wird und auf Rauschen konvergiert. Dies wird erreicht, indem über uninformativem Terrain die Beiträge zum Schätzer durch eine Gewichtungsfunktion verworfen werden, da der Informationsgehalt des Terrains wahrscheinlich im Rauschen untergeht.

Barkby et al. [Bar09a; Bar09b] verwenden eine Variante eines verteilten Partikelfilters zusammen mit einem profilbildenden Sonar, um eine Höhenkarte des Meeresbodens in Echtzeit zu schätzen. Als Datenstruktur dient ein Gitter, wobei in jeder Gitterzelle eine einzige Tiefenschätzung und eine zugehörige Unsicherheit liegen. Die Autoren geben einer Gitterstruktur den Vorzug vor merkmalsbasierten Methoden. Die Datenstruktur ist so angelegt, dass die Kopie der Karte auf neue Partikel beim Resampling-Schritt durch eine Partikelhierarchie und Eintragen einer Partikelkennung effizient von statten geht: Kindpartikel referenzieren die Elternkarte statt sie vollständig zu kopieren und tauschen nur Teile aus. Es wird also ein Ahnenbaum zur

Karte aufgebaut. Dieses Verfahren nennen Sie *bathymetric distributed particle SLAM* (BPSLAM). In weiteren Arbeiten präsentieren Barkby et al. Weiterentwicklungen des genannten BPSLAM Algorithmus [Bar11]. Dazu wird über Regression mittels Gauß'scher Prozesse versucht, auch in Gebieten mit wenig oder gar keinem Überlapp einen SLAM-Schleifenschluss herbeizuführen, indem die bekannte Karte extrapoliert wird und die Kompatibilität der Anschlusschätzung bewertet wird.

Hammond et al. [Ham14] wenden SLAM-Verfahren auf konkatenierte Daten eines MBES an. Sie verwenden merkmalsbasiertes GraphSLAM, da es auf große Kartierungsprobleme anwendbar ist und große Fehler in der anfänglichen Eigenbewegungsschätzung verzeiht. Da die 500 Tiefenwerte pro einzelner MBES-Messung laut den Autoren nicht ausreichend sind, um Scan-zu-Scan-Matching durchzuführen, wenden sie ein merkmalsbasiertes Verfahren an.

7.4 Fusion von Kamera- und Sonardaten

Die Fusion von Kamera- und Sonardaten wird eher selten beschrieben, meist im Zusammenhang mit Fragestellungen der Kalibrierung. Einige Arbeiten, die diese Modalitäten zusammen betrachten, seien im Folgenden genannt:

In Majumder et al. [Maj01] wird eine multisensorielle Datenfusion zur Unterwassernavigation gezeigt. Dies geschieht durch Eintragen von Sonardetektionen ins Videobild. Es wird betont, dass es im Unterwasserbereich nur wenige stabile und gut handhabbare Merkmale gibt und dass man sich nur auf Objekte verlassen sollte, die von Daten mehrerer Sensoren untermauert werden.

Mahon et al. [Mah04] zeigen die Kombination von Kamera- und Sonardaten um klassisches EKF-SLAM auf natürlichen Merkmalen zu betreiben. Einsatzgebiet der Technik ist die Vermessung von Habitaten am Great Barrier Reef in Australien. Dazu haben die Autoren ein spannendes Pencil-beam sonar und eine Kamera zueinander referenziert und projizieren die Sonarantworten ins Bild, um dort Merkmale mit hohem Kontrast zu identifizieren. Die Autoren stellen eine gute Übereinstimmung zwischen optisch und akustisch gefundenen Merkmalen fest. Bei der eigentlichen Kartenerstellung tritt der Beitrag des Sonarsensors jedoch stark in den Hintergrund.

In [Hur10] wird die Kalibrierung einer Kamera zu einem Multibeam-Sonar zur Unterwasser-3D-Rekonstruktion untersucht. Das Multibeam-Sonar wird ähnlich einem Laserscanner zur Kamera kalibriert. Dazu wird ein Schachbrettmuster für die Kamera auf ein Brett aufgebracht. Das erhabene angebrachte Brett hebt sich im Sonarprofil klar vom Boden ab. Mit mehreren Messungen aus unterschiedlichen Positionen werden Daten aufgenommen. Über eine Levenberg-Marquardt-Minimierung werden die Daten gefiltert. Bei realen statt simulierten Daten wurde zusätzlich RANSAC (engl. *Random Sampling Consensus*) angewendet um weitgehend sicherzustellen, dass keine Ausreißer die Daten verfälschen. Die Autoren hoffen, zukünftig einen optisch-akustischen Kalibrierkörper bauen zu können, der eine klare Zuordnung von akustischen Daten zu Kameradaten unter Berücksichtigung der Auflösungsunterschiede gewährleistet.

Negahdaripour et al. [Neg05] zeigt eine Kalibrierung einer DIDSON-Kamera, bei der er Tonnenverzerrung entfernt und eine radiometrische Korrektur durchführt sowie die Statistik des Bewegungsrauschens der Kamera untersucht. Dann führt er eine Mosaikierung der Daten durch, wie sie von optischen Bildern her gängig ist: Harris-Eckendektection gefolgt von RANSAC-Ausreißerbehandlung um Frame-zu-Frame Homographien zu schätzen. In [Neg07a] zeigt Negahdaripour analytisch, wie die epipolaren Konturen einer Stereokamera im Sonarbild eines FLS aussehen und umgekehrt. Dies wird für eine parallele Kameraanordnung und für »schielende« Kameras berechnet. Negahdaripour et al. [Neg07b] untersuchen das Zusammenspiel von Sonar und Videomaterial, führen aber explizit kein Matching zwischen den Modalitäten durch, sondern extrahieren Bewegungshinweise (engl. *motion cues*). Die Korrespondenzen werden für jede Modalität separat gebildet. Ziel sind Inspektionsaufgaben von vom Menschen gebauten Strukturen. In [Neg10b] zeigt Negahdaripour dann eine Stereoanordnung von FLS, die eine 3D-Rekonstruktion über Punktmerkmale erreicht. In [Neg10a] kalibriert er schließlich eine optische Kamera zu einem FLS mithilfe eines planaren Kalibrierkörpers. Sehr interessant ist die aktuelle Arbeit von Negahdaripour [Neg13]: Er beschreibt den durch Bewegung resultierenden Bildfluss in der FLS-Datenaufnahme mathematisch und berechnet aus den Schattenbewegungen dann eine 3D-Eigenbewegung. Zusammen mit Aykin zeigt er in [Ayk13] Rekonstruktionsergebnisse von real aufgenommenen geome-

trischen Prüfkörpern und berücksichtigt dabei den Entstehungsprozess des Signals.

Barat et al. [Bar05] führen eine Kamera-Sonar-Kalibrierung für ein Unterwasser-Fahrzeug durch. Ein Sonar scannt in einer Ebene, die im Sichtbereich der Kamera fast parallel zur optischen Achse liegt. Das Verfahren arbeitet auf simulierten Daten. Das Unterwasser-Fahrzeug fährt in Schlangenlinien über eine gerade Grenze im Untergrund (die für eine Grenze zwischen Sedimenttypen steht) und schränkt damit die möglichen extrinsischen Parameter des Systems ein. Die beiden für die Kalibrierung verwendeten Regionen müssen aber nicht durch eine Gerade getrennt sein oder besondere Merkmale enthalten, sondern müssen lediglich klar unterschiedliche Signaturen im Sonar und Videobild haben.

In [Kro11] zeigen Krout et al. die Fusion von FLS-Daten mit Kameradaten. Da es sich um das Matching zwischen Bildern einer Boje handelt, ist diese in den optischen wie in den akustischen Bildern gut sichtbar. In den Sonardaten reicht daher ein Schwellwertfilter zur Objektdetektion. Das Videobild wird in den HSV-Farbraum konvertiert und nur der S-Kanal verwendet, in dem sich die Boje gut abhebt. Daran schließt sich eine Erkennung der Vordergrundpixel an, die zu Objekten geclustert werden. Für das Tracking der Boje wird ein JPDA *joint probabilistic data association* Filter verwendet, das mit mehreren Zielen umgehen kann.

In [Woo15b] wird beschrieben, wie aktuelle optische und akustische Rekonstruktionsverfahren kombiniert werden können: Jede Modalität kann den Schätzvorgang der anderen Modalität stützen. Beispielsweise kann eine optisch homogene Fläche ein Indiz dafür sein, dass auch keine Merkmale im Akustischen vorhanden sind und eine Merkmalsplatzierung in diesem Bereich bestrafen. Umgekehrt helfen aus der akustischen Modalität gewonnene Tiefeninformationen bei der optischen Rekonstruktion bei der die vom Medium induzierten Bildverschlechterungen ausgeglichen werden.

7.5 Rein kamerabasierte Unterwasser-Anwendungen

Viele Arbeiten bringen die aus der Landrobotik bekannten Kamera-SLAM-Verfahren ohne große Anpassungen in die Unterwasserdomäne. Häufig

sind die Arbeiten biologisch motiviert und spielen sich in den obersten Wasserschichten mit genügend Sonnenlicht ab. Da Sonar hier keine Rolle spielt, wird nur ein kurzer Einblick in den Stand der Forschung gegeben.

Johnson-Roberson et al. [Joh10] zeigen rein visuelles SLAM mit Harris-Eckendetektor ([Har88]) und Lucas-Kanade-Tracker ([Luc81]) sowie Ausreißerdetektion und Triangulierung. Die Epipolargeometrie wird durch eine aus DVL-Daten geschätzte Ebene gestützt. Besonderes Augenmerk wurde darauf gelegt, große Bereiche kartieren zu können. Dazu stellen die Autoren ein SLAM-Verfahren vor, bei dem die Stereorekonstruktion und der SLAM-Vorgang entkoppelt sind, um die Komplexität gering zu halten.

Da die Anwesenheit eines Mutterschiffs in der Nähe aufgrund der Änderungen im Magnetfeld keine besonders genaue Kompasskalibrierung erlaubt, verbessern Jakuba et al. [Jak10b] die Kalibrierung des AUV-Magnetometers durch Bewegungsinformationen, die aus einem optischem SLAM-Verfahren fernab des Mutterschiffs gewonnen werden. Anwendung ist die optische Kartierung von Korallenriffen in Tiefen, die für Taucher zu groß sind.

Kim und Eustice zeigen in [Kim13] ein rein visuelles Unterwasser-Active-SLAM-Verfahren, das den Roboterpfad abhängig vom visuellen Informationsgehalt (»*saliency*«) anpasst und abschätzt, ob sich ein Weg lohnt, um einen SLAM-Schleifenschluss herbeizuführen. Dadurch wird eine gute Balance zwischen Exploration und Wiederbeobachtung erreicht.

7.6 Schallbasierte Navigation über Wasser

Rein schallbasierte Lösungen über Wasser sind im SLAM-Bereich eher unüblich, weil an Luft viel leistungsfähigere Sensorik zur Verfügung steht.

Moravec und Elfes setzten bereits 1985 einen Roboter mit einem Ring von 24 Schallwandlern ein, die im 15°-Abstand zueinander angebracht sind [Mor85]. Jeder Wandler hat einen Öffnungswinkel von etwa 30°. Mit den Detektionen füllen sie eine zweidimensionale Belegtheitskarte. Es wird aber kein SLAM angewendet, die Detektionen werden entsprechend der Koppelnavigation in die Karte eingetragen.

Bonci et al. [Bon05] fusioniert Video und Ultraschallsensorik, wobei die Entfernungswerte der Schallsensoren ähnlich zu Entfernungswerten eines Laserscanners behandelt werden.

Für Innenraumanwendungen konzipiert ist das Verfahren von Tardós [Tar02], bei dem verglichen wird, was statt mit teuren Laserscannern mit vergleichsweise günstiger Ultraschallsensorik in SLAM-Anwendungen machbar ist. Zusätzlich zur deutlich geringeren Genauigkeit der Ultraschallmessungen reflektieren Wände den Schall sehr stark spiegelnd (siehe Abschnitt 4.2.3), was zu Mehrfachechos führt. Die Autoren verwenden daher eine verbesserte Sonarsensormodellierung, die nicht nur Punkte, sondern Kreisbögen verwendet, und eine Datenassoziation, die die Houghtransformation auf diese Kreisbögen anwendet. Damit erreichen sie in einem Subkarten-SLAM-Ansatz eine konsistente 2D-Karte, die einerseits genau genug für Navigationsaufgaben sei, andererseits aber weniger detailliert als die Karte des Laserscanners.

7.7 Sonarsimulation

7.7.1 Übersicht

Um Sonardaten zu simulieren wird selten die Wellengleichung direkt gelöst, sondern es werden Approximationen der Wellengleichung verwendet, wie sie in Abschnitt 3.3 beschrieben sind.

Petillot [Pet14] nennt folgende vier üblichen Simulationstechniken, die im Bereich der Objekterkennung zum Einsatz kommen:

- Ray Tracing (etwa von Bell [Bel95]) wird als langsames Verfahren bezeichnet, das die Ausbreitung des Schalls durch Strahlen simuliert, wobei es möglich ist, Mehrwegeausbreitung zu modellieren.
- Der energiebasierte Ansatz (etwa von Pailhas et al. [Pai09]) verwendet die Sonargleichung, kommt mit schwierigen Rauschquellen zurecht und ist zudem sehr schnell.
- Der Pseudo-spektrale Zeitdomänenansatz [Liu98] (engl. *pseudo-spectral time domain*, *PSTD*) ist ein Differentialgleichungslösungsverfahren und löst die volle Wellengleichung. Damit können Resonanz und schwierige Grenzflächen modelliert werden, das Verfahren ist jedoch äußerst langsam.
- Augmented Reality: Hier werden simulierte Objekte in echte Szenen platziert, so dass keine Notwendigkeit besteht, komplexe Meeresböden zu simulieren. Das ist schnell, aber nicht besonders genau.

Dem sind noch Frequenzbereich-Ansätze hinzuzufügen, die mit Hilfe von Green'schen Funktionen arbeiten, etwa Groen [Gro06] oder Hunter [Hun06].

Eine erschöpfende Beschreibung von Unterwasser-Schallausbreitungsmodellen und deren Simulation findet der Leser im Buch von Etter [Ett13].

Die Approximationsmethode durch Raytracing spielt bei den vorgestellten Arbeiten später eine tragende Rolle, weswegen der Stand der Technik hierzu besonders ausführlich im nächsten Abschnitt beschrieben wird.

7.7.2 Überblick über Sonarsimulatoren

Im Folgenden werden wichtige Arbeiten im Bereich der Simulation von Sonarsignalen vorgestellt, bei denen Raytracing eine große Rolle spielt.

7.7.2.1 Sidescan-Simulation von Bell

Eine grundlegende und umfassende Arbeit in diesem Bereich wurde von Bell [Bel95] durchgeführt. Hier wird ein Sidescan-Sonar ausführlich über Raytracing simuliert. Bell untersucht unterschiedliche Bereiche der Simulation: Sie berücksichtigt Effekte durch die Fahrzeugeigenbewegung genauso wie die Einflüsse durch den Schallwandler (Strahlbreite, Abstrahlcharakteristik) und die Pulslänge. Darüber hinaus erlaubt ihr Ansatz eine geschichtete Wasserstruktur mit unterschiedlicher Brechung. Der Simulator gestattet die Erzeugung eines synthetischen Meeresbodens und die Verwendung unterschiedlicher Rückstreumodelle, sowie verschiedene Sedimenttypen. Außerdem ist er in der Lage Mehrwegeausbreitung zu berücksichtigen. Der Meeresboden wird als Dreiecksnetz auf einer 2,5D-Höhenkarte modelliert. Zusätzlich können mathematisch definierte Objekte in die Szene eingebracht werden, bei denen der Schnitttest mit der mathematischen Darstellung des Objekts erfolgt. Z. B. werden Pipelines als liegender Zylinder modelliert. Bell modelliert Mehrwegeausbreitung, weist aber darauf hin, dass dies bei natürlichem Terrain nur einen sehr geringen Einfluss hat. Sobald Strukturen wie z. B. eine Pipeline im Bild sind, tritt Mehrwegeausbreitung häufiger auf. Die Fahrzeugbewegung wird als sog. Stop-and-hop-Bewegung angenähert. Das bedeutet, dass das Aufnahmesystem während der Dauer einer Messung im Stillstand ist und für die nächste Messung gemäß der Fahrzeugbewegung weiter gesetzt wird.

Bell modelliert kein Speckle-Rauschen, da das Modell nur deterministische Streuung und Absorptionsverluste modelliert. Die Bildstatistik von Sidescan-Daten wird allerdings untersucht und es wird vorgeschlagen, wie stochastische Modelle integriert werden könnten.

Für die Bodenmodellierung verwendet Bell fraktale Modelle, die einem Potenzgesetz folgen und in Linnett [Lin91] und Bell et al. [Bel97] näher detailliert sind.

Die Näherung, die Abtastpunkte jeder Einzelmessung am Meeresboden als gerade Linie zu betrachten, anstatt sie als gebogen zu repräsentieren, wie es bei tatsächlicher Berücksichtigung der Fahrzeugvorwärtsbewegung geschehen müsste (siehe etwa in Cobra [Cob90]), bringt nach Bells Einschätzung nur minimale Abweichungen mit sich.

In Bell et al. [Bel97] wird der Simulator aus [Bel95] noch verfeinert, indem etwa Hin- und Rückweg des Strahls separat betrachtet werden, da der Ausbreitungsverlust abhängig von der Richtung des Energieflusses ist.

7.7.2.2 Sidescan-Simulation von Pailhas

Die Sidescan-Simulation von Pailhas [Pai09; Pai10b] basiert auf Pseudo-Raytracing (s. u.) und ist daher auf 2,5D-Höhenkarten beschränkt. Der Meeresboden wird aus Ebenen zusammengebaut: Aus einer globalen, sich langsam verändernden Höhenkarte, einem Sedimentteil und einer fraktalen Partitionierung, die Orten einen Sedimenttyp zuweist. Folgende Sedimente stehen zur Verfügung: flacher Meeresboden, Sandwellen, Steine/Felsen und »Clustered« (poisson-verteilte, jeweils mit zufälligen Ebenen geschnittene, konvexe Objekte). Die Sandwellen des Terrains werden durch anisotropisches pinkfarbenes Rauschen modelliert, Fels wird mithilfe der Fourier-Transformation (wie in Abschnitt 8.3.2) modelliert. Der Clustered-Typ wird durch in der Ebene poisson-verteilte Würfel modelliert, die durch zufällige Ebenenschnitte zu unregelmäßigen konvexen Objekten geformt werden. Zusätzlich können noch Objekte in Form typischer Seeminen in die Szenen eingefügt werden. Den Bildern wird a posteriori Rauschen hinzugefügt, um ein bestimmtes *SNR* zu erreichen. Das Rauschen wird als Kohärenzrauschen gemäß einer Rayleigh-Verteilung erzeugt. Des Weiteren verwendet Pailhas Lambert'sche Streuung für die simulierten Targets, passt den Reflektanzfaktor aber an die akustische Impedanz des Materials an. Die Reflektanz des Meeresbodens wird mit dem APL-UW-Modell simuliert (siehe Abschnitt 4.2.7.6). Die

Dämpfung durch chemische Relaxation wird numerisch über die François-Garrison-Formel (Anhang A) berücksichtigt. In der Arbeit wird auch eine Minenerkennung durch PCA-basierte Klassifikation mit Trainingsbeispielen aus dem Simulator vorgestellt.

Pseudo-Raytracing

Das in Pailhas et al. [Pai09] und auch bei Coiras et al. [Coi07] verwendete Pseudo-Raytracing geht von konstanter Schallgeschwindigkeit aus, so dass sich die Schallausbreitung durch gerade Strahlen beschreiben lässt. Es werden keine Strahlen vom Sensor aus geschickt, sondern vom Nadir nach außen wird die Meeresbodenoberfläche elementweise durchgegangen und die Winkel von dort aus zum Sensor hin betrachtet. Wenn man den bisher maximalen Streifwinkel im Speicher behält, weiß man, dass es sich bei allen Oberflächenteilen um Schatten handelt, bei denen sich der Winkel nicht vergrößert. Dieses Vorgehen wird unter anderem Namen auch von Padiäl angewendet (Abschnitt 7.3.2). Das Verfahren funktioniert nur für 2,5D-Terrains, ist aber deutlich schneller als vollständiges Raytracing.

7.7.2.3 Simulator von Guériot

Eine ziemlich neue Simulationsumgebung wird von Guériot et al. [Gué11] vorgestellt. Sie unterstützt als Szeneninhalte mathematische Objekte aber auch facettenbasierte Darstellungen komplexerer Objekte, d.h. es können auch echt dreidimensionale Objekte simuliert werden. Es kann nicht nur Sidescan-Sonar simuliert werden, sondern auch andere Sonartypen wie z. B. FLS oder Multibeam-Sonare. Zur Berechnung der Sonarsignale steht zusätzlich zu einem strahlbasierten Ansatz noch ein röhrenbasierter Ansatz zur Verfügung. Auch eine zeitlich veränderliche Umgebung ist möglich. Der strahlbasierte Ansatz verwendet die Verfahren aus [Bel95]. Der röhrenbasierte Ansatz sorgt durch die Betrachtung eines Volumens dafür, dass Objekte nicht zwischen zwei Strahlen zu liegen kommen können und dadurch nicht getroffen werden. Die Röhren haben polygonalen Querschnitt und werden durch Strahlen begrenzt. Sender und Empfänger müssen nicht am gleichen Ort sein, eine bistatische Konfiguration (siehe Abschnitt 4.2.5) ist möglich. Die Röhren werden von Sender und Empfänger ausgehend so lange aufgespalten, bis nur noch Elementarröhren vorkommen. Das sind Röhren, die nur noch eine einzige Facette der Oberfläche schneiden. Dann kann für jede Schnittfläche

zwischen einer Sender-Elementarröhre und einer Empfänger-Elementarröhre die Interaktion mit der Facette berechnet werden und im Empfänger kombiniert werden. Dadurch ist vollständige Energieerhaltung zwischen Sender und Empfänger gegeben. Mit dem Röhrenansatz können laut den Autoren auch Brechung und Randeffekte simuliert werden. Der Simulator bietet auch die Möglichkeit, eine kohärente Simulation durchzuführen, allerdings betonen die Autoren, dass die Wahl der Verteilung der Elementarstreuer innerhalb einer Auflösungszelle einen schwer vorherzusagenden Einfluss hat. Außerdem ist die Phasenstatistik der simulierten Daten anders als der in Wirklichkeit vorgefundene. Dennoch sind die Signale so gut, dass Beamforming und Interferometrieberechnungen erfolgreich angewendet werden konnten.

7.7.2.4 Simulator von Riordan

Riordan et al. [Rio05] zeigen einen inkohärenten Raytracing-basierten Simulator, der das Hauptaugenmerk auf eine dynamische Verfeinerung des betrachteten Dreiecksnetzes der Umgebungskarte beim Raytracing legt. Durch das verfeinerte Netz wird dann ein Schnitt gelegt und ein Höhenprofil extrahiert. Auf diesem Schnitt wird dann zweidimensionales Raytracing durchgeführt. Dadurch wird der Simulator echtzeitfähig und erreicht statt 10–12 s pro Ping eine Wiederholrate von 4–5 Hz. Es steht ein isotropes fraktales Bodenmodell und ein anisotropes Bodenmodell für Sandwellen zur Verfügung. Als Rückstreuemodell wird das Jackson-Modell verwendet. Das Modell ist an eine Labview-Anwendung gekoppelt und zeigt die simulierten Daten in Echtzeit an.

7.7.2.5 Simulatoren von Groen und Coiras

Der Simulator SIMONA, der von Groen [Gro06] vorgestellt wurde, wurde für SAS-Anwendungen entwickelt. Er nimmt geradlinige Schallausbreitung im Wasser an und basiert auf der Sonargleichung (siehe Abschnitt 4.2.8). Alle Elemente der Simulation sind punktförmig oder Ansammlungen von punktförmigen Objekten. Da die Abstände zwischen den Punkten kleiner sein müssen als die Wellenlänge, kommen für ein Objekt bis zu einer Million Punktzentren zum Einsatz. Die Signalerzeugung wird im Zeit- oder im Frequenzbereich durchgeführt. Bei wenigen Punkten im Zeitbereich, bei komplexeren Objekten aus vielen Punkten mit der Kirchhoff-Näherung (siehe

Abschnitt 4.2.7.1) im Frequenzbereich mithilfe von Green'schen Funktionen. Mehrwegeausbreitung wird unterstützt, indem Spiegelobjekte eingeführt werden. Für sedimentbedeckte Objekte wird Brechung an der Sedimentgrenze und eine veränderte Dämpfung verwendet.

Der SIGMAS-Simulator [Coi09b] basiert auf der Frequenzbereich-Simulation des SIMONA-Simulators (Abschnitt 7.7.2.5), wobei der Fokus dieses Simulators auf Geschwindigkeit liegt. Für Objekte, die nicht glatt, sondern in der Größenordnung der Wellenlänge rau sind, kann auf eine komplexe Summation der Signale verzichtet werden und die inkohärente Beschreibung ist eine gute Näherung. Die Interferenzeffekte können dann durch eine Rauschverteilung beschrieben werden (siehe auch Abschnitt 5.6). Coiras et al. [Coi09c] zeigen eine durch Berechnungen auf der Grafikkarte (GPU) beschleunigte Version des SIGMAS-Simulators.

7.7.2.6 Simulator von Hunter

Hunter hat in [Hun06; Hun02] einen Simulator für InSAS entwickelt, und verwendet ein erweitertes Kirchhoff-Rückstreumodell für die Oberflächen. Es können beliebige Szenen und Aufnahmegeometrien modelliert werden. Mit einer neuen Methode im Fourierraum kann die Streuung an dreieckigen Facetten effizienter berechnet werden. Hierzu wird eine Lookup-Tabelle für Referenzdreiecke vorberechnet. Auch teilverdeckte Facetten werden berücksichtigt. Da die Stop-and-hop-Näherung bei SAS Bildfehler (geometrische Verzerrung und Unschärfe) hervorruft, wird auch der Einfluss der Plattformbewegung simuliert. Der Simulationskern basiert auf Raytracing, mit dem Abstände, Verdeckungen und Mehrwegeausbreitung modelliert werden. Die Strahlausbreitung wird aufgrund der kurzen Aufnahmedistanzen als linear angenommen. Für Szenen mit bis zu einer Million Facetten erreicht die Rechenzeit die Größenordnung von Tagen, weshalb der Autor eine MPI-Parallelimplementierung (*message passing interface*) für Großrechenanlagen erstellt hat, mit der die Simulation dann nur noch die Größenordnung von Stunden benötigt. Für die Simulation einer Facette werden auf einem Rechner mit einem 1,8GHz Prozessor etwa 5 Sekunden benötigt.

7.7.2.7 Simulator von Bracker

In [Bra08] zeigt Bracker eine Simulation über Raytracing mit Kohärenzerweiterung. Raytracing wird für die inkohärenten Signalanteile wie z. B. den Meeresboden durchgeführt, da die kohärente Modellierung als extrem aufwändig bezeichnet wird und Stunden bis Tage für einen einzigen Standpunkt dauert. Die Rückstreu-Intensität wird für Schlamm-, Sand- und Kiesboden nach dem SEARAY-Modell berechnet (siehe Abschnitt 4.2.7.5). Die kohärente Modellierung erfolgt für Objekte, die auf dem Meeresboden platziert werden. Diese liegen als Dreiecksnetz vor und bilden eine große Anzahl an Facetten, die in der Größenordnung der Wellenlänge liegen. Für diese Objekte wird das umgebende kohärente Schallfeld simuliert.

7.7.2.8 Simulator von Buskenes

Einen Simulator zur Klassifikation von Objekten in SAS-Daten stellen Buskenes et al. [Bus14] vor. Der Einsatzzweck ist die möglichst wenig verzögerte Erzeugung von Sonartemplates aus geschätzten Szenenparametern. Daher liegt der Fokus dieser Arbeit stark auf der parallelen Datenverarbeitung auf der GPU. Die Bilder werden erzeugt, indem eine Kamera die Szene betrachtet und gemäß des Lambert'schen Rückstreugesetzes Intensitäten für die Oberflächen berechnet. Durch ein zugehöriges Tiefenbild werden die zum selben Abstand gehörigen Intensitätswerte aufsummiert. Damit ist eine schnelle Simulation mit über 100 Bildern pro Sekunde möglich.

7.7.2.9 Simulator von Borawski

In [Bor05] wird versucht die Sonarsimulation durch optisches Raytracing durchzuführen: Eine Kamera in der Flughöhe des Trägerfahrzeugs schaut senkrecht nach unten auf die Szene, die Lichtquelle ist auf gleicher Höhe seitlich positioniert. Dann wird ein Basisbild per Raytracing erzeugt. Aus diesem Ergebnisbild werden dann Zeilen ausgeschnitten und als Messung betrachtet. Durch unterschiedliches Ausschneiden sollen unterschiedliche Geschwindigkeit, Kurvenfahrt und Rollbewegung simuliert werden. Der erzeugte Schattenwurf ist zwar ähnlich zu dem Schattenwurf, wie er bei Sidescan-Sonaren auftritt, jedoch nicht identisch. Durch die rein optische Simulation kann kein Layover oder Foreshortening simuliert werden: Der hohe Mast des von Borawski verwendeten Schiffsmodells müsste ein früheres

Echo erzeugen, im Sidescan-Bild also scheinbar dem Sonar zugeneigt sein. Die Rollbewegung wird durch verschobene Ausschnitte simuliert, was jedoch unzutreffend ist, da die Rollbewegung lediglich Intensitätsänderungen hervorruft (siehe Abschnitt 9.1.3). Ob das addierte Rauschen einer Rayleigh-Statistik folgt, ist nicht angegeben.

7.7.2.10 Simulation in der Wassersäule

Den Fokus auf Schall-Raytracing besonders langer Strecken legen Dushaw et al. [Dus98], wobei der Fokus nicht auf der Modellierung der Interaktion mit dem Meeresboden liegt, sondern auf der sog. ozeanischen Tomografie liegt, die zum Ziel hat, die Eigenschaften der Wassersäule zu bestimmen.

7.7.3 PSTD-basierte Simulationen

7.7.3.1 k-Wave

Das freie Softwarepaket k-Wave von Treeby et al. [Tre10; Tre12] für MATLAB löst die Wellengleichung nach einem PSTD-Ansatz direkt und ist damit ein interessantes Werkzeug, um die Effekte der Schallausbreitung z. B. an Grenzflächen zu sehen. Allerdings machen der große Speicherbedarf und die langsame Rechengeschwindigkeit (trotz Berechnung auf der GPU) den Einsatz für Sidescan-Sonare schwierig, da durch die großen Abstände bei dennoch hohen Frequenzen extrem viele Auflösungszellen berechnet werden müssen. Die Toolbox bietet auch die Möglichkeit, bei genügend vielen und entsprechend verteilten Empfängern durch Zeitumkehrung oder durch eine frequenzbasierte Methode ein Rekonstruktionsproblem zu lösen.

7.7.3.2 Simulator von Elston und Bell

Elston et al. [Els04] simulieren Niederfrequenz-Sidescan-Sonarbilder (26 kHz) eines Sandwellen-Terrains mithilfe des PSTD-Verfahrens und führen Untersuchungen zur Bildstatistik durch, wobei sie an die Bilder Rayleigh-Mixturen und die K -Verteilung anpassen. Für das gewählte Szenario ist die K -Verteilung eine besser passende Annahme als die Rayleigh-Verteilung, da in jeder Auflösungszelle nur wenige und räumlich unterschiedlich verteilte Streuzentren liegen. Für ein Bild der Größe 2048×512 Pixel dauert die Simulation 12 Stunden auf einem 800 MHz Rechner.

7.7.4 Simulation der Rückstreuung

Lyons [Lyo91] modelliert die Rückstreuung für das GLORIA-Sonarsystem (Abschnitt 7.2) und führt eine Inversion der Daten durch, um die wahren Rückstreuwerte zu gewinnen. Dazu untersucht er verschiedene Rückstreu-Modelle für unterschiedliche Sedimentparameter. Er kommt zu dem Schluss, dass das Jackson-Modell in diesem Anwendungsfall die besten Ergebnisse liefert.

In George et al. [Geo95] wird die Rückstreuung eines sandigen Meeresbodens simuliert. Dies geschieht mithilfe eines Facettenmodells erstmals für Frequenzen, die deutlich über 100 kHz liegen. Die Simulation modelliert ein Sector-Scan-Sonar und ein Sidescan-Sonar. Die Autoren stellen eine ordentliche Übereinstimmung ihres Modells mit experimentell gewonnenen Daten fest.

Gautier et al. [Gau04] untersuchen die Rückstreuung von einer fraktalen Oberfläche und führen akustische Experimente mit einem gefrästen Granitblock durch. Sie sind besonders interessiert am Verhalten nahe des Nadir und vergleichen die Messungen mit den theoretischen Vorhersagen eines Kirchhoff-Modells. Sie betrachten den hochfrequenten Bereich von 172 kHz bis 2,572 MHz. Im Ergebnis halten sie fest, dass selbstähnliche Oberflächen zu wellenlängenabhängiger Streuung führen.

Detailuntersuchungen zu den Rauheitsspektren fraktaler Oberflächen und die Schwierigkeiten bei der Fertigung von künstlichen Referenzoberflächen durch Fräsen werden durch Summers et al. [Sum07] dargelegt.

7.7.5 Meeresbodenmodellierung

Eine sehr gängige Modellierung des Meeresbodens ist, die Frequenzverteilung der Reliefamplituden als Potenzgesetz (engl. *power law distribution*) anzunehmen. Bereits Fox et al. [Fox85] ermitteln für reale Sonardaten eine Frequenzverteilung nach einem inversen Potenzgesetz im Betragsspektrum bei gleichverteilter Phase. Lyons et al. [Lyo02] haben durch Stereokamerabild-Rekonstruktion die wahre Meeresbodengeometrie vermessen und dann eine Frequenzanalyse durchgeführt. Sie kommen ebenfalls zu dem Schluss, dass ein inverses Potenzgesetz eine gute Näherung darstellt. In Moore et al. [Moo02] wird der Meeresboden mit Laserscanner-Triangulation vermessen und auch hier ist ein inverses Potenzgesetz eine gute Näherung. Dieses

isotropische Potenzgesetz ist das einfachste und meistgenutzte Modell zur Modellierung von Meeresboden [Jac07]:

$$f_r := f_r(f_x, f_y) := \sqrt{f_x^2 + f_y^2}, \quad (7.1)$$

$$H_{\text{mod}}^{\text{iso}}(f_x, f_y) := f_r^{-\beta} \text{ mit } \beta \in [1, 2]. \quad (7.2)$$

Dabei bezeichnet $H_{\text{mod}}^{\text{iso}}(f_x, f_y)$ die Modifikation des Frequenzverlaufs. Diese Modellierung findet auch bei Linnett [Lin91], Bell [Bel95], Riordan et al. [Rio05] und Pailhas et al. [Pai09] Anwendung.

Das Potenzgesetz kann nur für eine gewisse Anzahl an Skalen gelten, sobald man sich den Skalen in Richtung null oder unendlich nähert, wird das Modell pathologisch [Jac07]. Problematisch ist nämlich, dass je nach Exponent des Potenzgesetzes die Standardabweichung der Höhenwerte mathematisch gesehen unendlich wird, und damit zur Quantifizierung der Rauheit der Oberfläche unbrauchbar ist. Ein Grund dafür, dass es dennoch oft verwendet wird, ist, dass Rückstreumodelle mit einer praktischen, funktionellen Form der Rauheitsspektren einfacher formuliert werden können [Jac07].

Bei der Wahl des Parameters β bestehen einige Freiheiten: Bei Wahl von $\beta = 1$, besitzen die dadurch beschriebenen Terrains selbstähnliche (fraktale) Eigenschaften, wie sie in der Natur oft vorkommen. Die gleiche Verteilung ist auch als pinkfarbenes Rauschen (engl. *pink noise*) bekannt. Vollständige Selbstähnlichkeit ist bei Meeresboden nur eingeschränkt zu erwarten, denn hydrodynamische Prozesse oder biologische Aktivitäten arbeiten auf einem individuellen räumlichen Frequenzband, und sofern diese Bänder nicht großteils überlappen, kann kein skalenfreies Verhalten eines Potenzgesetzes erwartet werden [Jac07]. Für die Wahl eines geeigneten β gibt es daher unterschiedlichste Empfehlungen: Jackson et al. [Jac07] und Summers et al. [Sum07] empfehlen $\beta = 1$ um natürliches Terrain zu simulieren, da nur dann volle Selbstähnlichkeit gegeben sei. Eine Verteilung gemäß pinkfarbenem Rauschen mit $1 < \beta < 2$ schlägt [Pai10b] in seinem Simulator vor. Riordan verwendet in seinem Simulator 1,1–1,3 [Rio05]. Bell [Bel95] gibt als typischen Wert 0,8 an, der zur als besonders natürlich empfundenen fraktalen Dimension 2,2 korrespondiert.

Bezüglich der statistischen Eigenschaften der Meeresboden-Rauhheitsmodelle wird oft räumliche Stationarität angenommen, d. h. alle statistischen Maße wie z. B. die Kovarianz oder Momente höherer Ordnung sind unab-

hängig vom Auswerteort. Dann hängt die Kovarianz nur von der Differenz der Ortsvektoren ab, an der das Relief gemessen wird [Jac07]. Oft wird zusätzlich angenommen, dass die Meeresboden-Rauhheit einer Gauß'schen Statistik folgt, dass also das Spektrum (die Statistik zweiter Ordnung) ausreicht, um eine vollständige Charakterisierung zu erreichen. Beispielsweise wird im Kirchhoff-Modell (Abschnitt 4.2.7.1) genau diese Annahme gemacht, dass die Rauheit Gauß'scher Statistik genügt, also Kovarianz bzw. Spektrum alle statistischen Eigenschaften bestimmen [Jac07]. Das ist zwar eine ungeprüfte Annahme, die aber ebenso im Small-Slope-Modell erfolgreich zum Einsatz kommt. Ein Beispiel für einen Meeresboden, bei dem die Annahme nicht zutrifft, ist ein mit Seeigeln und Muschelschalen bedeckter Boden [Jac07]. Jackson et al. [Jac07] verweisen auf weiterführende Literatur, in der weitere statistische Methoden benutzt werden, um den Meeresboden zu beschreiben, wie z. B. die Autokorrelation und Steigungshistogramme.

Obwohl Gagnon et al. [Gag06] in ihren umfangreiche Analysen, welche Potenzgesetze natürliche Topographien am besten beschreiben, zu dem Schluss kommen, dass multifraktale Beschreibungen besser geeignet sind, als die in dieser Arbeit verwendete monofraktale Beschreibung, erwächst durch die monofraktale Beschreibung kein prinzipieller Nachteil. Die oben genannten Autoren sehen eine monofraktale Beschreibung allesamt bereits als gute Näherung des Meeresbodens an und die Simulation kann zukünftig ohne grundsätzliche Änderungen auch um ein multifraktales Bodenmodell erweitert werden.

Bergström stellt mit dem Random Surface Generator [Ber12] ein Programm vor, mit dem Oberflächen mit vorgegebener Korrelationslänge, unterschiedlichen Höhenverteilungen und unterschiedlichen Autokovarianzverteilungen erzeugt werden können. Es ist auch die Erzeugung nicht-isotropen Terrains möglich.

Die in dieser Arbeit verwendete Modellierung des Meeresbodens wird später in Abschnitt 8.3.2 detailliert vorgestellt.

7.8 Umgebungsrekonstruktion aus Sonardaten

7.8.1 Sonarschatten

Die Sonarschatten von Objekten sind ein wichtiges Bildmerkmal, welches viele Verfahren als Hinweis für die Höhe eines Objekts verwenden, etwa [Bel06; Ree03; Ree04; Bik08; Zer96]. Allerdings reicht die Schatteninformation alleine nicht aus, um die Form eines Objekts vollständig wiederzugeben.

Petitot beschreibt in [Pet14] als Faustregel, dass zur Auswertung von Bildern hochauflösender Sonare die Information in den Schlaglichtern (engl. *highlights*) verwendet werden sollte, während bei mittleren Auflösungen die Verwendung der Schatten hilfreicher sei.

7.8.2 Shape from shading

Aus der optischen Domäne sind Verfahren, die aufgrund von Helligkeitsunterschieden eine Form schätzen wollen als Shape-from-shading-Verfahren bekannt. Eine Formulierung für die Regularisierung dieses Shape-from-shading-Problems durch Glattheitsannahmen für die Oberfläche wurde bereits 1991 in Li et al. [Li91] gegeben.

In Munk et al. [Mun09] wird die akustische Tomografie des Ozeans beschrieben, bei der es darum geht, Strömungen in der Wassersäule zu erfassen. Die Autoren betonen, dass der Begriff Tomografie für dieses Unterfangen unglücklich gewählt ist, da fast alle Aspekte anders sind, wie in der medizinischen Tomografie: Weder die Orts- und Zeitskalen sind ähnlich, die Strahlverläufe unterscheiden sich stark und nicht zuletzt ist die Technologie eine ganz andere. Außerdem heben die Autoren hervor, dass in der Medizin Vorwissen meist nicht vorhanden ist und auch nicht gebraucht wird, bei der Ozeantomografie das Vorwissen aber sehr stark eingeht.

In den Meereswissenschaften wird der Begriff der geoakustischen Inversion noch viel umfassender gebraucht: Dort ist die Elevation kein vorrangig gesuchter Parameter, sondern eher die Sedimentdichten, Sedimentschichtdicken, Schallgeschwindigkeiten, Dämpfungen, Scherkräfte und Eigenschaften der Wassersäule.

Beispielsweise verwendet Dosso [Dos06] Bayes'sche Inversion, um aus Reflektanzdaten geoakustische Parameter wie Druckwellengeschwindigkeit,

Dichte, Kompressionsdämpfung, Scherwellengeschwindigkeit und Scherdämpfung zu schätzen. Die Daten wurden erzeugt, indem eine Breitbandquelle nahe der Oberfläche geschleppt wurde, während ein omnidirektionaler Empfänger am Meeresboden verankert war. Der Reflexionskoeffizient kann dann durch das Verhältnis von direkter zu der vom Boden reflektierten Energie berechnet werden (unter Berücksichtigung der Antennencharakteristik und der Schallausbreitung). Anschließend wird eine maximum-a-posteriori (MAP) Schätzung durch *adaptive simplex simulated annealing* (ASSA) gewonnen. Als priore Wahrscheinlichkeiten werden Gleichverteilungen über die sinnvollen Parameterintervalle verwendet. Der Datenfehler wird als *nuisance parameter* mitgeschätzt.

Die in dieser Arbeit unternommene Schätzung der Oberfläche stellt eine geoaustische Inversion dar, wobei man nur an einem Parameter (Elevation) interessiert ist. Die Vernachlässigung der anderen Parameter ist bereits eine Regularisierung, da ein Modell mit all diesen Parametern so viele Freiheitsgrade hätte, dass die Eindeutigkeit der Lösung noch viel stärker leiden würde. Man müsste beispielsweise an jedem Raumpunkt die Schallgeschwindigkeit c schätzen.

Im Folgenden wird eine Übersicht über Shape-from-shading-Ansätze für Sidescan-Sonardaten vorgestellt [Woo10a]:

Cuschieri et al. [Cus90] stellen ein einfaches 3D-Rekonstruktionsverfahren vor: Das Sonarecho wird per TVG kompensiert, dann wird für jedes Sample entschieden zu welcher von 3 Klassen das Signal gehört: Das Signal kann gleich stark wie ein vorab definiertes Nominalsignal sein, stärker oder null. Null bezeichnet den Sonarschatten, stärker bedeutet ein Schlaglicht und damit eine Erhebung. Mit der Schattenlänge l_{shadow} und dem Abstand zum Objekt r_{obj} wird mit der Flughöhe h_{AUV} nach folgender Formel die Objekthöhe

$$h_{obj} := \frac{l_{shadow} \cdot h_{AUV}}{l_{shadow} + r_{obj}}. \quad (7.3)$$

Gleichzeitig eintreffende Echos von unterschiedlichen Objekten werden nicht berücksichtigt, da sie nicht konsistent über mehrere Beobachtungen seien, sondern nur in einzelnen Messungen auftreten. Die Basishöhen aufeinanderfolgender Sonarlinien, die den ebenen Meeresboden kennzeichnen, gegen den die Veränderung stattfindet, wurden mithilfe eines least-squares-Verfahrens angeglichen. Die 3D-Rekonstruktion wird noch weiter gefiltert

und stellt die Eingabe für ein Modul dar, das auf dem Meeresboden Regionen von Tälern, Hügeln und Graten erstellt. Die Autoren räumen ein, dass es »gewisse Übereinstimmung« mit den Daten gibt.

In [Lan91] wird von Langer et al. ein Verfahren namens »Propagation Shape-from-shading« (PropSfS) vorgestellt, das das vorgenannte Verfahren erheblich erweitert: Die Sonardaten werden durch Stapelung der Sonarzeilen als Bild behandelt und zunächst durch eine mehrfache Anwendung eines modifizierten Medianfilters mit variabler Filtergröße vorgefiltert. Die Modifikation besteht darin, dass negative Extrema gefiltert werden, positive aber nicht. Gegen das Speckle-Rauschen wird ein Graduated-Non-Convexity-Filter eingesetzt, das eine Funktion an die Daten anpasst und dabei die Glattheit und die Unstetigkeitsstellen mitberücksichtigt. Anschließend erfolgt eine 1D-Schattendetektion für jede Sonarzeile: Es werden Stellen gesucht an denen die Intensität stark abfällt. Wenn die folgenden Samples bestimmten Bedingungen genügen, wird eine Schattenregion definiert, die aufhört, sobald die Steigung des Signals ein Vorzeichenwechsel von minus nach plus besitzt. Kanten ohne nachfolgenden Schatten werden verworfen und Schattenbereiche werden durch einen Clustering-Algorithmus gruppiert.

Da das Problem der Rekonstruktion stark unterbestimmt ist, werden folgende Annahmen getroffen: Die Intensität eines Samples hängt nur von der Oberflächennormale unter dem Betrachtungswinkel ab. Verwendet wird ein ähnliches Rückstreumodell wie das Torrance-Sparrow-Modell, das ein Kirchhoff-Modell ist (siehe Abschnitt 4.2.7.1). Es besteht aus einem diffus streuenden Anteil und einem spiegelnden Anteil. Da die gewählte Formulierung nicht geschlossen lösbar ist, verwenden die Autoren eine Lookup-Tabelle.

Es werden zwei Verfahren zur eigentlichen Rekonstruktion vorgestellt, ein 1D-Verfahren, das von innen nach außen arbeitet und ein 2D-Verfahren, das auf Zylinderkoordinaten basiert: Beim 1D-Verfahren werden ausgehend vom Nadir Oberflächenstücke mit der berechneten Normalen α aneinandergesetzt. Die Normalen der Oberflächenstücke liegen alle in der Ebene, die durch den Elevationswinkel aufgespannt wird. In Schattenbereichen wird die Oberfläche entlang der Sichtlinie um die Schattenlänge fortgesetzt. Durch die Aneinanderreihung vom Nadir nach außen akkumulieren sich Schätzfehler in den Außenbereichen. Außerdem hängt die Rekonstruktion von der Wahl der Startwerte im Nadir ab. Um die Inkonsistenz zwischen den

Schätzungen einzelner Zeilen zu reduzieren, haben die Autoren das Verfahren auf 2D erweitert. Durch die Wahl von Zylinderkoordinaten und Darstellung des Normalenvektors als Ableitung der Oberfläche erhalten Langer et al. eine Differenzialgleichung, die sie durch finite Differenzen annähern. Auch hier werden die Werte am Rand (also im jeweiligen Nadir der zugehörigen Sonarlinie) als bekannt angenommen. Die Propagation der Rekonstruktion vom Nadir nach außen bleibt erhalten, jedoch werden die Normalen zwischen den Zeilen konsistent geschätzt.

In [Li91] wird eine Minimierung eines Shape-from-Shading-Energiefunktionals mittels Euler-Lagrange-Gleichungen durchgeführt. Der Lagrange-Parameter dient der Regularisierung und bestimmt die Glattheit der Lösung. Die Oberflächenreflektanz wird nicht als global konstant, aber als sehr langsam veränderlich angenommen und kann damit in Unterbereichen als konstant angesehen werden. Der Betrachtungsvektor wird als bekannt angenommen und als Rückstreumodell kommt das Lambert-Modell zum Einsatz. Es werden zusätzlich grob aufgelöste bathymetrische Karten als a-priori 3D-Informationen verwendet, um den Iterationsprozess zu stützen. Das Verfahren verwendet mehrere Auflösungsstufen, um in einer Grob-zu-fein-Strategie eine bessere Schätzung zu erreichen. Es werden zudem noch Plausibilitätsschranken verwendet, innerhalb derer sich die Schätzung bewegen darf. Das Verfahren verwendet einen ähnlichen Ansatz wie das Verfahren von Coiras et al. [Coi07], das in Abschnitt 9.4.2 erweitert wird.

In [Dur04] vergleicht Durá das PropSfS-Verfahren von Langer et al. [Lan91] mit einem Verfahren genannt »Linear SfS« (LinSfS), das in Bell et al. [Bel99] entwickelt wurde. Als Referenz dienten in Ermangelung geeigneter Daten die Simulationsdaten aus dem Simulator von [Bel95]. Dadurch ist eine Grundwahrheit zu den Schätzergebnissen gegeben. Obwohl dargelegt ist, dass das Lambert-Modell insgesamt eine gute Näherung ist, werden zur Evaluation nur Ausschnitte aus mittleren Reichweiten von Sidescan-Aufnahmen verwendet, da dort die Lambert-Annahme besonders gut mit der Realität übereinstimmt. Die Sonarzeilen werden zu einem Sonarbild gestapelt, welches fortan als Einheit gesehen wird. Das LinSfS-Verfahren behandelt die Sonardatenaufnahme als gerichteten Filterungsprozess und wird im Fourierbereich beschrieben [Bel99]. Annahmen für das Verfahren sind neben der Lambert'schen Streueigenschaft ein senkrecht zur Fahrtrichtung montierter Schallwandler, ein konstanter Beschallungswinkel für die gesamte Szene, ver-

nachlässigbarer Einfluss von Schattenwurf und Verdeckung sowie konstante Oberflächenreflektanz. Laut den Autoren gilt für die Fouriertransformierte der Höhenkarte $\mathcal{F}\{h\}$:

$$\mathcal{F}\{h\}(\omega, \varphi_a) = \frac{\mathcal{F}\{b\}(\omega, \varphi_a)}{V I_i \sin(2\beta_m) (\operatorname{sgn}(\cos(\varphi_a + \tau)) \cdot d_p + \cos(\varphi_a + \tau)) i \omega}, \quad (7.4)$$

$$\text{mit } 0,5 < d_p < 0,75. \quad (7.5)$$

wobei $\mathcal{F}\{b\}$ die Fouriertransformierte des Sonarbildes darstellt, β_m den Montagewinkel des Sonars zur Hochachse und damit die Beleuchtungsrichtung und τ den Kurswinkel der geraden Überfahrt über die Höhenkarte und damit den »Beleuchtungswinkel« gegenüber der x -Achse. Ferner bezeichnet ω die Kreisfrequenz und φ_a die Richtung bezüglich der x -Achse. Mit V wird ein empirisch gewonnener Reflexionskoeffizient bezeichnet. Der Parameter d_p wird bereits bei Pentland [Pen90] eingeführt, ohne dass seine Bedeutung erklärt wird. Das Verfahren kommt als lineares Filter prinzipbedingt nicht mit Schattenwurf zurecht, das Ergebnis des Vergleichs zeigt aber, dass es sehr unempfindlich gegenüber Rauschen ist und der Fehler gleichmäßig verteilt ist, da es nicht wie PropSfS einen Fehler fortpflanzt, sondern punktweise schätzt. Das Fazit in [Dur04] ist, dass beide Verfahren ihre Stärken und Schwächen haben und gezielt dort eingesetzt werden sollen, wo die Vorbedingungen eine gute Leistung erwarten lassen.

In [Pet02] wird für eine Pipeline-Detektion ein Sidescan-Bild mittels eines unüberwachten Markov-Random-Fields in Schatten/Nicht-Schatten-Bereiche segmentiert. Dann werden Geraden als einfache Näherung für eine Pipeline auf die Segmente durch ein Least-Median-Squared-Verfahren auf die Schattenbereiche gefittet. Dann wird für die Geraden entschieden, ob sie eine wahrscheinliche Lösung darstellen, indem Vorwissen über das Bayes-Theorem eingebracht wird. Über die Likelihood wird ein Modell einer Pipeline derart erstellt, dass die Rohrsegmente nahe zusammen und aneinander ausgerichtet sind. Die Autoren sprechen an, dass eigentlich umfangreiche Informationen über das Pipeline-Feld vorliegen, was eine besonders geeignete Prior-Wahrscheinlichkeit darstellen würde, beschränken sich aber darauf, mit der prioren Wahrscheinlichkeit Situationen auszuschließen, in denen mehrere Linien über die gleiche Pipeline gelegt werden. In der Arbeit werden Sidescan-Daten rein bildbasiert verarbeitet. Durch die

Aufgabe der Pipeline-Detektion wird zwar modellbasiert vorgegangen, aber mit einem rein ansichtsbasierten Modell.

In [Bik08] werden ähnliche Voraussetzungen gemacht wie in den bisher beschriebenen Verfahren auch: Isotrope Schallausbreitung, bekanntes Reflektanzmodell, bekannte Flughöhe des Unterwasserfahrzeugs. Es werden zwei Rekonstruktionsalgorithmen vorgestellt: Ein linienbasiertes und ein flächenbasiertes Verfahren. Beim linienbasierten Verfahren wird angenommen, dass sich die Normale eines Oberflächenelements in einer Ebene senkrecht zur Fahrtrichtung befindet und die Pixelintensität wird als proportional zur akustischen Intensität des Echos angenommen. Der Algorithmus funktioniert ähnlich wie das PropSfS-Verfahren, indem er zeilenweise Höhendaten nach folgendem Vorgehen schätzt: Schattenbereiche werden mit einem Schwellwertverfahren in den Sonardaten erkannt. Dann wird aus der Helligkeit eine Oberflächensteigung berechnet und diese durch finite Differenzen angenähert beginnend von einem Initialwert im Nadir. Die Höhenwerte in Schattenbereichen werden als unbekannt angenommen, die Höhenwerte für die Fortsetzung (zeitlich) hinter einem Schattenbereich werden gemäß des Winkels des Bestrahlungsvektors fortgesetzt. Das flächig arbeitende Verfahren ist ebenfalls ähnlich zu dem zweidimensionalen PropSfS-Verfahren, nur dass es in kartesischen Koordinaten und nicht in Zylinderkoordinaten arbeitet. Die Schätzung erfolgt aber genauso vom Nadir nach außen und arbeitet auf Dreiecken als Oberflächenelementen.

7.8.3 Andere Ansätze

Ein Ansatz zur volumetrischen Rekonstruktion von InSAS-Daten wird von Hayes [Hay08] beschrieben: Er bedient sich Inferenzmethoden auf MRFs, die verwandt sind mit den Methoden, die in Abschnitt 9.4.4 zur Rekonstruktion verwendet werden: Die Daten eines InSAS werden in ein Rekonstruktionsvolumen bestehend aus Voxeln zurückprojiziert. Durch die interferometrische Anordnung werden nur wenige Voxel getroffen. In diesen Voxeln wird die Kohärenzinformation des Sonarsignals abgelegt. Dies geschieht für mehrere Messungen. Dann wird für jedes Voxel eine Wahrscheinlichkeit errechnet, dass es sich um ein Oberflächenvoxel handelt, was durch eine Kompatibilitätsfunktion der Messungen in jedem Voxel erreicht wird. Durch iterierten Nachrichtenaustausch mittels Loopy-Belief-Propagation zwischen den Voxeln wird eine MAP-Belegung gefunden, die die Oberfläche wiedergibt.

Das auf den Voxeln verwendete MRF ist ein verstecktes paarweises MRF, das über die paarweisen Verbindungen Glattheitsannahmen über die Oberfläche fordert. Im Gegensatz zu den in Abschnitt 9.4.4 genannten Verfahren ist die Nachrichtenerzeugung für die Inferenz hier kein Problem, da die Nachrichten nur über wenige Nachbarknoten gebildet werden.

Brahim et al. [Bra11] führen eine 3D-Rekonstruktion auf FLS-Bildern ähnlich zu optischen Verfahren auf monokularen Kameras durch. Dazu extrahieren sie repräsentative Punkte, für die sie die fehlende Höhe über Grund zu schätzen. Durch Punktpaare in aufeinanderfolgenden Bildern wird durch Suche im 7-dimensionalen Parameterraum die Kamerabewegung und die Höhe über Grund über einen evolutionären Algorithmus ermittelt. Als Ergebnis der Schätzung wird für die einzelnen Punkte eine Höhe bestimmt, die mit der Grundwahrheit bis auf einige Zentimeter übereinstimmt.

In Lu et al. [Lu02] wird ein Ansatz vorgestellt, der aus der Stereobildverarbeitung kommt und mehr als eine Überfahrt über ein Gebiet voraussetzt. Die Sidescan-Sonarlinien werden gestapelt und als Bilder behandelt. Das Verfahren setzt auch das Vorhandensein von GPS-Daten voraus. In der Evaluation verwenden die Autoren synthetisch erzeugte GPS-Daten für die Position in der Horizontalen, für die Vertikale (Flughöhe) wird aus dem FBR (siehe Abschnitt 6.3.3.2) durch gleitende Mittelung ein Wert geschätzt. Die Sidescan-Daten werden anschließend in Ground-Range-Koordinaten projiziert und in kleinere Sub-Bilder aufgeteilt. Das eigentliche Matching erfolgt nach folgendem Vorgehen: Durch Integration der Grauwerte der Sub-Bilder werden quasi Randverteilungen gebildet. Auf diesen wird versucht eine globale Bewegung zu finden, die korrigiert wird. Dann werden die Sub-Bilder nochmals in Zonen entlang der Fahrtrichtung aufgeteilt und erneut Randverteilungen gebildet. Die Extrema der Randverteilungen werden zurückprojiziert und die Schnittpunkte sind dann Kandidatenpunkte für die Merkmale. Zur Korrespondenzfindung werden alle Kandidatenpunkte gegeneinander verglichen und nur bei gegenseitiger Übereinstimmung als korrektes Merkmal verwendet. Die Bestimmung der 3D-Punkte aus den Korrespondenzen geschieht wie bei konventionellen Stereokameraverfahren. Das Verfahren setzt bei der Suche nach ähnlichen Merkmalen rein auf Methoden der Bildverarbeitung. Da dasselbe Objekt aus verschiedene Betrachtungsrichtungen sehr unterschiedliche Intensitäten erzeugen kann,

ist noch zu klären, wie fehlerfrei die für die Rekonstruktion notwendige Datenassoziation gelingt.

Zerr und Stage [Zer96] zeigen ein Verfahren, das aus vielen auf einer Kreisbahn um ein Objekt herum aufgenommenen Daten eines FLS (Abschnitt 6.3.6) die Form des Objekts rekonstruiert. Für jede Sicht auf das Objekt wird eine Objektsilhouette aus einer Schlaglicht/Schatten-Segmentierung gewonnen. Diese Silhouetten werden in eine Elevationskarte zurückprojiziert und das Schnittgebilde rekonstruiert das Objekt. Inspiriert von der Tomografie erstellen sie zusätzlich eine Reflektanzkarte durch Radontransformation und Rückprojektion. Die Karten werden zusammengefügt und ergeben eine texturierte Version des Objekts. Das Verfahren ist auf eine große Anzahl Sichten angewiesen und kann für jede Sicht auf die Aufnahme des ganzen Sektors zurückgreifen. Beim Erfassen eines Gebiets mit einem Sidescan-Sonar werden Objekte in der Regel nicht sehr häufig aufgenommen und durch die schmale Strahlbreite werden Objekte in jeder Aufnahme nicht zur Gänze erfasst. Daher eignet sich dieses Verfahren nicht zur Rekonstruktion von Gestaltinformationen aus Sidescan-Sonaren.

In Kraus et al. [Kra10] und Lorenson et al. [Lor09] wird eine 3D-Voxelrekonstruktion aus Daten eines simulierten hochfrequenten Nahbereichsonars mit zwei Array-Antennen in gekreuzter Konfiguration gewonnen. Durch die Verwendung von 12 Frequenzbändern können 12 unabhängige Messrichtungen realisiert werden. Das hat zur Folge, dass ein 3D-Bild mit 120×120 Strahlen aus nur 10 Sende-/Empfangszyklen erhalten wird. Dies resultiert in einer Wiederholrate von 6,5 Hz. Die Ziele werden als Überlagerung von Kugeln mit unterschiedlichem Durchmesser und unterschiedlichen Positionen simuliert. Die Sonarsamples in jedem Sonarstrahl werden entweder nach dem Nächste-Nachbar-Verfahren oder mit bilinearer 3D-Interpolation in eine Voxelkarte eingetragen. Alternativ wird vorgeschlagen, nur die Maxima einzutragen. Aufgrund der Rauschverhältnisse ist eine Filterung unumgänglich. Aus Effizienzgründen wird aus den Daten eine 2,5D-Darstellung gewonnen. Durch die mehrfache Beobachtung der Voxel innerhalb einer Aufnahme, wird ein 1D-Medianfilter über alle Beobachtungen für jeden Bildpunkt angewendet, das einem Medianfilter variabler Größe aus der 2D-Bildverarbeitung überlegen ist, da das 1D-Filter die Auflösung nicht reduziert.

Hoelscher-Hoebing et al. [Hoe10] betrachten Bildfusion von Daten eines Multi-Beam/Multi-Aspect Sidescan-Sonars. Pro Ping werden 300 Empfangs-

strahlen mit Öffnungswinkel $0,2^\circ$ ausgewertet. Danach erfolgt eine Segmentierung der Pixel der Einzelaufnahmen in drei Klassen (Schatten, normales Bodenecho, Objekt) durch ICM auf einem MRF. Da die Daten nur inkohärent fusioniert werden müssen, reicht die Genauigkeit der Koppelnavigation aus, um die überlappenden Bereiche zu referenzieren. Die Fusion findet für die drei Klassen entsprechend über Minimumbildung, Mittelwertbildung respektive Maximumbildung statt und erreicht eine Kontrasterhöhung. Die Verfahren sind schnell und vollautomatisch und daher für die Echtzeitanwendung in einem AUV geeignet.

Der CUBE-Algorithmus [Cal03a] erzeugt Oberflächenrekonstruktion aus MBES-Daten unter Verwendung von Unsicherheiten. Er wird industriell verwendet und gilt als Gold-Standard an dem sich andere Verfahren messen lassen müssen. Er verwendet die Unsicherheitsbeschreibung in Form der TPU (siehe Anhang B.2.1). Eine verbesserte Version CUBEv2 bzw. CHRT ist in [Cal11] beschrieben.

7.9 Fazit

Die in diesem Gebiet erfolgten Arbeiten stützen sich oft auf Methoden der Bildverarbeitung und modellieren die Fahrzeugzustände sehr oft nur zweidimensional. Damit einhergehend wird die Schwierigkeit der Datenassoziation oft thematisiert, die meistens händisch und nur selten automatisiert durchgeführt wird. Ebenfalls wird deutlich, dass eine Kartierung mithilfe von Sidescan-Sonardaten nur selten versucht wird. Meist kommen direkt profilbildende Sonare zum Einsatz oder bildgebende wie rundumschauende Sonare (Abschnitt 6.3.5) oder vorwärtsgerichtete Sonare (Abschnitt 6.3.6). Eine Rekonstruktion aus diesen Daten ist durch die deutlich höhere Wiederholrate für die Aufnahme desselben Merkmals erheblich einfacher.

Internationale Genauigkeitsanforderungen, wie sie kommerzielle Anbieter erfüllen müssen, sind nur für profilbildende Sonare definiert. Daher sind sie für diese Arbeit nur mittelbar relevant. Im Anhang B werden dennoch ein paar Informationen dazu gegeben.

Simulation von Sidescan-Sonardaten

8.1 Einführung

Zur Entwicklung von Rekonstruktionsverfahren werden idealerweise reale Messdaten mit bekannter Grundwahrheit (ground truth) verwendet. Diese standen jedoch leider nicht zur Verfügung und müssen erst durch zeit- und kostenintensive Messkampagnen gewonnen werden. Bestehende Testdatensätze sind nach Kenntnis des Autors ebenfalls nicht verfügbar. Daher wurden eigene Sonarsimulationen entwickelt²³, die Sidescan-Sonarmessungen für ein Unterwasserfahrzeug erzeugen [Woo12c; Woo15a]. Diese Verfahren zur Simulation werden im Folgenden vorgestellt.

8.2 1D-Simulationsumgebungen

Für die Erweiterung des iterativen Schätzverfahrens auf Kurvenfahrten in Abschnitt 9.4.2 wurden zwei inkohärente Simulationsumgebungen erstellt, die auf Pseudo-Raytracing basieren: Eine Simulation, die mit einer 3D-Punktwolke arbeitet und eine, die auf 1D-Profillinien einer 2,5D-Höhenkarte arbeitet [Woo13b; Woo13a].

8.2.1 Profillinien-Simulationsumgebung

Die Simulation für 1D-Profillinien ist eine inkohärente Simulation. Sie ermittelt für jeden Punkt auf einer Terrain-Profillinie den Winkel zwischen dem Sichtvektor zum Sonarsensor und dem Normalenvektor des Terrains und aufgrund dessen eine Intensität gemäß des Lambert'schen Rückstreumodells. Die Terrainlinie wurde mittels linearer Interpolation aus einer 2,5D-Höhenkarte gewonnen. Die Abtastung der Profillinie geschieht äquidistant in

²³ Die in Abschnitt 7.7 vorgestellten Simulatoren sind nicht frei zugänglich. Auch Anfragen, simulierte Daten für Beispielszenarien zu bekommen, wurden negativ beantwortet.

Bodenkoordinaten. In der Simulation kann eine 2D-Antennencharakteristik sowie unterschiedliche Bodenreflektanz berücksichtigt werden. Es wird keinerlei Rauschen modelliert. Diese Simulationsumgebung wurde für das Rekonstruktionsverfahren in Abschnitt 9.4.3.6 verwendet.

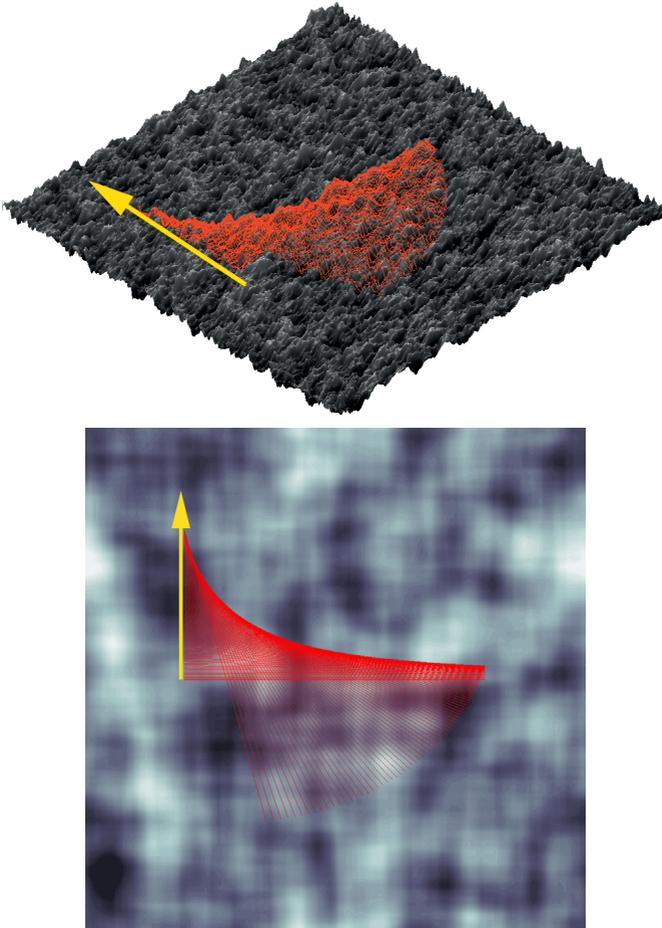


Abbildung 8.1: Grundwahrheit für die Profillinien-Simulationsumgebung: *Oben:* Elevationskarte mit »schlitternder« Geradeaustrajektorie mit Gierwinkel. Die Orte der Messungen sind rot eingezeichnet. Die Karte hat eine Auflösung von 1000×1000 Einheiten. Der mittlere Höhenwert der Karte wurde auf $z = -500$ gelegt. *Unten:* Grundwahrheits-Reflektanzkarte.

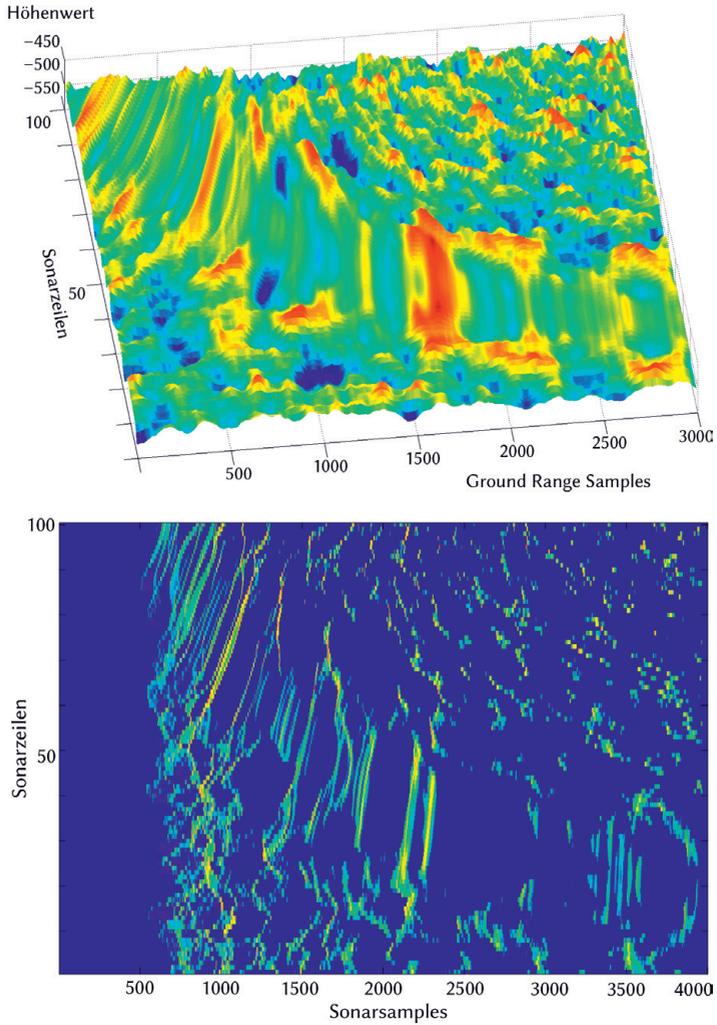


Abbildung 8.2: *Oben:* Aus der Grundwahrheit durch die Trajektorie erzeugte Höhengschnitte. Die Verzerrungen durch die Rotation sind deutlich zu erkennen. *Unten:* Ergebnis der 1D-Profillinien-Sonarsimulation. Der Schattenwurf ist deutlich erkennbar und ist in den fernen Bereichen stärker ausgeprägt.

Die Grundwahrheit einer Beispielsimulation ist in Abbildung 8.1 gezeigt. Die zugehörigen Höhenprofile und die Sonarantworten sind in Abbildung 8.2 dargestellt.

8.2.2 Punktwolkenbasierte Simulationsumgebung

Die punktwolkenbasierte Simulationsumgebung verwendet als Repräsentation der Daten eine Punktwolke der Point Cloud Library (PCL)²⁴. Als Eingabe für die Simulation dient eine analytische Darstellung der Oberfläche als Summe von zufällig platzierten Wu(2,1)- oder Wendland(2,2)-Kernelfunktionen aus der entsprechenden Funktionsfamilie. Diese Kernel sind in Abbildung 8.3 abgebildet. Sie zeichnen sich durch ihre Glattheit bei dennoch beschränktem Support aus und werden in Zhang [Zha08] und Schaback [Sch95] für die Terrainmodellierung vorgeschlagen:

$$k_{2,1}^{\text{WU}}(r) := \begin{cases} \frac{1}{4}(1-r)^4(4+16r+12r^2+3r^3) & \text{für } |r| \leq 1 \\ 0 & \text{sonst,} \end{cases} \quad (8.1)$$

$$k_{2,2}^{\text{WEND}}(r) := \begin{cases} (1-r)^4 \cdot (4r+1) & \text{für } |r| \leq 1 \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} \quad (8.2)$$

Aus dem analytischen Terrain wurde eine regelmäßig abgetastete Grundwahrheitspunktwolke erzeugt, indem an den Abtaststellen die entsprechenden Höhenwerte zugewiesen werden. Danach werden die Oberflächennormalen an den Punkten der Grundwahrheitspunktwolke berechnet. Zur Simulation der Fahrzeugbewegung wurde ein Fahrzeug ohne Nick- oder Rollbewegung auf konstanter Flughöhe mit Gierwinkeländerungen in der Trajektorie angenommen. Zur Erzeugung einer Messung muss entsprechend der Fahrzeug-eigenbewegung für jeden Wegpunkt ein Höhenprofil und die Normaleninformation aus der Grundwahrheitspunktwolke extrahiert werden. Um Treppenbildung zu vermeiden, wurde der Höhenwert nicht durch eine Nächste-Nachbar-Suche abgetastet, sondern durch inverse Distanzgewichtung der k -Nächsten-Nachbarn interpoliert. In Abbildung 8.4 ist dargestellt, wie das AUV eine vorgegebene Trajektorie beschreibt und entlang dieser die Höhenwerte für die künstliche Sonarmessung gewinnt. Aus diesen wird dann eine Sonar-

²⁴ <http://pointclouds.org/>

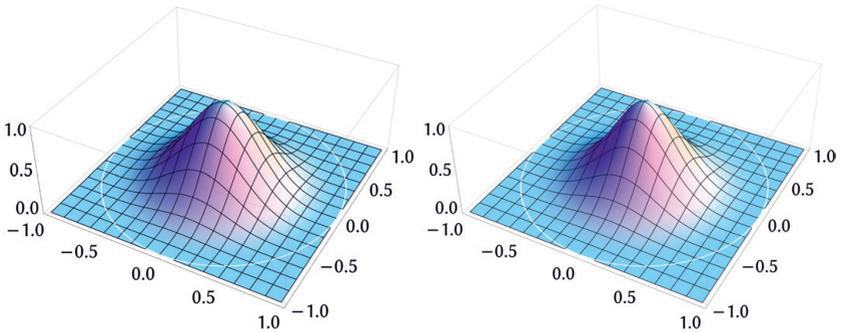


Abbildung 8.3: Wu-Kernel $k_{2,1}^{WU}$ (links) und Wendland-Kernel $k_{2,2}^{WEND}$ (rechts).

messung generiert. Die aus der Kurvenfahrt gewonnenen Grundwahrheits-Höhenprofile sind in Abbildung 8.5 (oben) dargestellt. Sichtbar sind die Verzerrung und insbesondere das Backscanning (Abschnitt 7.2.1) durch die Kurvenfahrt (die beiden übereinanderliegenden hellen Stellen rechts oben), das zur doppelten Aufnahme von Bodenbereichen führt. Dies würde im unmodifizierten Originalverfahren nach Coiras et al. [Coi07] zur Schätzung von zwei verschiedenen Erhöhungen führen. Die Erzeugung der Sonarsignale (Abbildung 8.5 Mitte und unten) erfolgt durch Pseudo-Raytracing wie in Abschnitt 7.7.2.2 beschrieben unter Annahme eines Lambert'schen Rückstreumodells. Nah am Nadir sind im Ground Range Bild Artefakte durch die geringe Sampleddichte zu sehen.

Die Auswertesoftware (siehe Abbildung 8.6) erlaubt eine interaktive Inspektion der wahren und geschätzten Daten.

Die auf Pseudo-Raytracing basierende Rückstreuungssimulation kam auch bei der 1D-Variante des Kernel-Rekonstruktionsverfahrens (Abschnitt 9.4.3) zum Einsatz, wurde jedoch für die Rekonstruktion im 2,5D-Fall durch die fortschrittlichere Simulation in Abschnitt 8.3 abgelöst, die im Folgenden vorgestellt wird.

8.3 3D-Sonarsimulation

In der entwickelten Sonarsimulation »WOSIM« sollen die recht starren Möglichkeiten der 1D-Simulation gelockert werden, um noch mehr Situationen

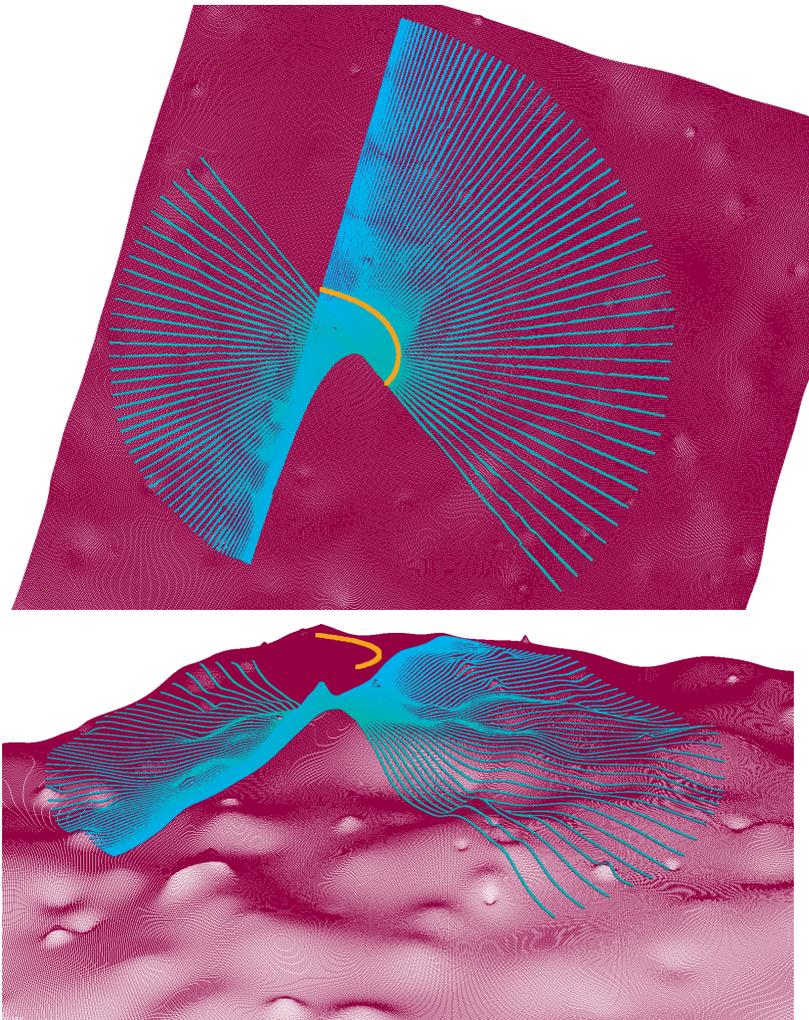


Abbildung 8.4: Zwei Ansichten von der Abtastung einer Kernel-Grundwahrheitsoberfläche (magenta) durch eine Sonaraufnahme (cyan) entlang einer Kurventrajektorie (orange). Die erhaltenen Höhenmessungen wurden auf der Punktwolke interpoliert.

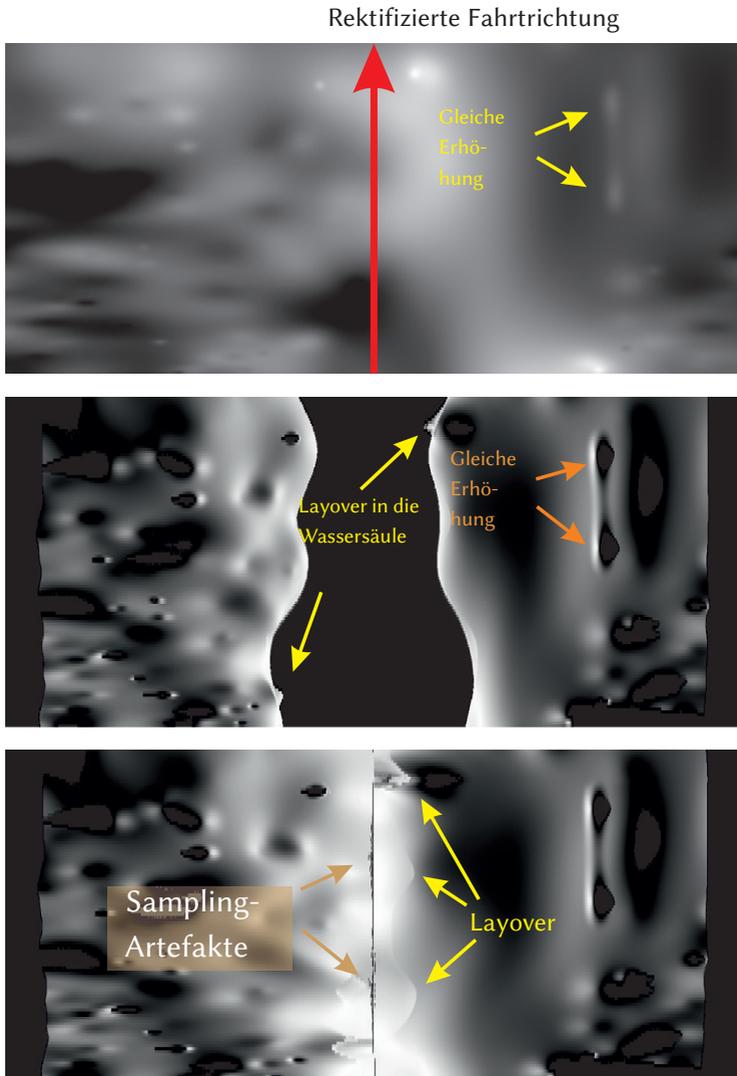


Abbildung 8.5: Aus der Überfahrt von Abbildung 8.4 gewonnene Grundwahrheit-Höhendaten (oben). Dunkle Grauwerte stehen für niedrige Höhenwerte, helle Grauwerte entsprechend für Erhebungen. Die erzeugten Sonardaten in Slant-Range-Koordinaten (mitte) und Ground-Range-Koordinaten (unten). Die Reichweite für Slant Range und Ground Range betragen hier auf jeder Seite 200 Meter.

simulieren zu können, wie etwa beliebige Fahrzeugeigenbewegung, Fahrt über einige natürliche Terraintypen, verschiedene Sonar-Betriebsmodi, eine dreidimensionale Antennencharakteristik und beliebige 3D-Szenen.

Ein virtuelles Fahrzeug nimmt entlang einer beliebigen Trajektorie an Wegpunkten (6D-Posen) über dem Terrain Sonarmessungen vor. Dies geschieht unter Zuhilfenahme eines Raytracing-Renderers, der Distanz- und Normalenkarten der Oberfläche pro Wegpunkt liefert. Mit diesen Informationen wird dann eine Sonaraufnahme (»Sonarzeile«) entweder eines klassischen Konstantfrequenz-Sidescan-Sonars (engl. *continuous wave, CW*) oder eines modernen frequenzmodulierten »gechirpten« Sidescan-Sonars (FM) simuliert, die in früheren Arbeiten wie etwa von Bell [Bel95] noch nicht simuliert wurden.

Die Simulationsumgebung ist in zwei Aufgabenbereiche geteilt: Im Geometrieteil werden per Raytracing zuerst die rein geometrischen Szenendetails ermittelt, während der Akustikteil (Abschnitt 8.3.3.5 und folgende) daraus eine Sonarmessung erzeugt.

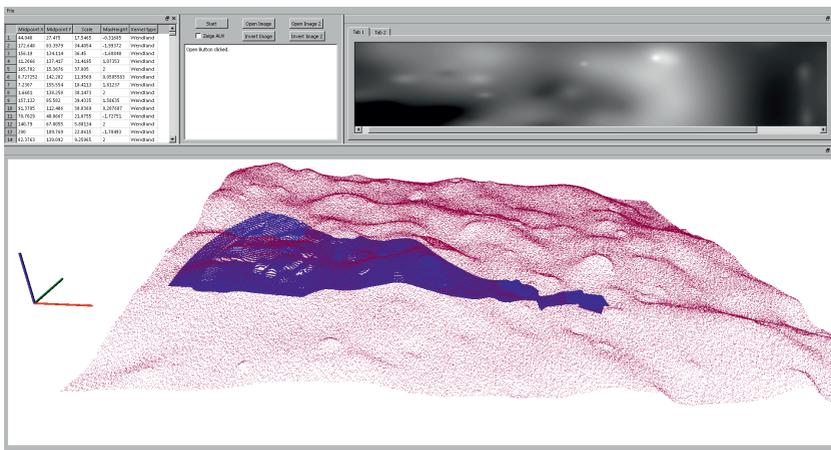


Abbildung 8.6: Grafische Benutzeroberfläche der punktwolkenbasierten Simulation.

8.3.1 Gewinnung geometrischer Information

Die 3D-Simulation verzichtet darauf, einen eigenen Raytracer zu implementieren und verwendet den Open-Source-Renderer »Mitsuba« [Jak10a].

Da Mitsuba zur Generierung optischer Bilder entwickelt wurde und keine Unterstützung für Zeitsignale bietet, wird er lediglich verwendet, um für eine gegebene Szene Abstandsinformationen und Informationen über die Oberflächennormalen durch Raytracing zu berechnen.

Im Gegensatz zu anderen Simulatoren (z.B. von Pailhas et al. [Pai10b]) kann durch die Verwendung eines vollständigen 3D-Renderers eine »echte« 3D-Szene simuliert werden und nicht nur eine 2,5D-Höhenkarte. Dies geht allerdings zu Lasten der Geschwindigkeit, da für eine 2,5D-Höhenkarte Pseudo-Raytracing (siehe Abschnitt 7.7.2.2) ausreichend ist.

In den Geometrieteil können im Prinzip beliebige Szenen in einem für Mitsuba lesbaren Format eingespeist werden. Auch die Kombination einer generierten Höhenkarte mit geometrischen Primitiven, die der Renderer anbietet, ist im Simulator möglich.

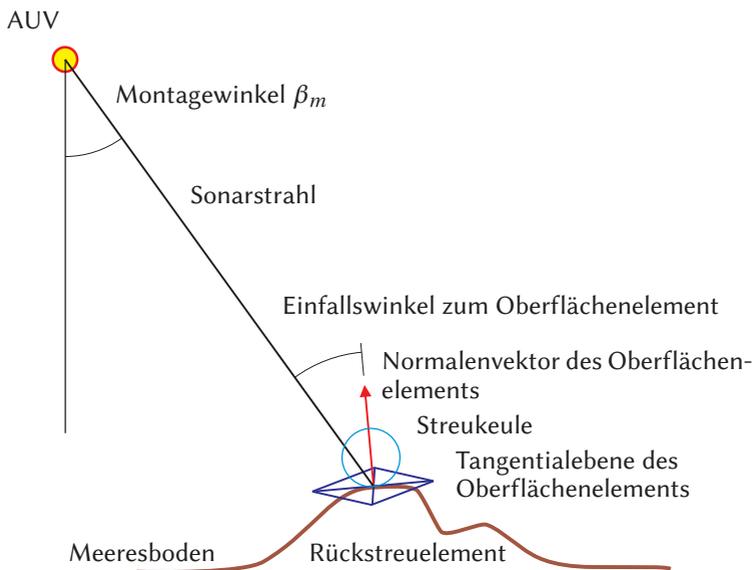


Abbildung 8.7: Raytracing-Schema

Die Ausgabe des Geometrieteils sind die Einzelstrahlen, die die Eingabe zur Simulation der Sonarsignale darstellen: Für jedes Pixel in der Bildebene der Sonarapertur wird der Abstandswert zum ersten Objekt im Sichtstrahl und

der Normalenvektor des getroffenen Oberflächenstücks ausgegeben. Dies ist in Abbildung 8.7 schematisch dargestellt.

Der Datenaustausch wird im OpenEXR-Format²⁵ vorgenommen, das aus der Filmbranche stammt. Es bietet die Möglichkeit, Mehrkanalbilder effizient abzulegen. Das ist praktisch, da so für die Sonarapertur jeweils die Distanzwerte und Normalenvektorkomponenten als separate Kanäle in einem einzigen Mehrkanalbild abgelegt werden können.

8.3.1.1 Umsetzung im Renderer

Im optischen Raytracing ist es üblich, für ein Pixel mehrere Strahlen auszusenden, um an Objektkanten Mischfarben zu erzeugen, die das Ergebnis optisch deutlich verschönern. Für die akustische Simulation ist diese Vorgehensweise jedoch schädlich: Es kann dann nämlich vorkommen, dass zwei Strahlen innerhalb eines Pixels zwei verschiedene Objekte treffen oder dass von einem Strahl gar kein Objekt getroffen wird. Dadurch haben die Strahlen deutlich unterschiedliche bzw. ein Strahl einen maximal großen Weg zurücklegt (im Sinne der endlichen Genauigkeit der Fließkommaarithmetik). Bei der Mittelung mit den anderen Strahlen innerhalb des Pixels kommt dann scheinbar ein Tiefenwert in der Szene vor, der keinen tatsächlichen Reflektor in der Szene als Entsprechung hat, was zu einer fehlerhaften Erzeugung von Sonarechos führt. So entstehen Geisterechos von nicht existenten Objekten. Verwendet man nur einen Strahl pro Pixel, kann dies nicht passieren. Die dadurch geringere Menge an Strahlen kann man jedoch leicht erhöhen, indem man die Auflösung der Pixelebene feiner wählt. Daher hat die Einschränkung auf einen Strahl pro Pixel keine prinzipiellen Nachteile.

8.3.1.2 Apertur

Die verwendete Sonarapertur hat standardmäßig eine Auflösung von 218×6538 Punkten, was etwa 1,4 Millionen Strahlen pro Aufnahme entspricht. Zunächst ergibt sich die Winkelauflösung der Apertur aus den designten Öffnungswinkeln $\varphi_a = 50^\circ$ und $\varphi_e = 1^\circ$ mit der daraus resultierenden Antennencharakteristik (siehe Abschnitt 8.3.3.5). Aus Effizienzgründen wird die Sonarapertur in beiden Winkelrichtungen nur ein paar Grad größer als die

²⁵ <http://www.openexr.com> zuletzt abgerufen am 01.10.2015

Sonarhauptkeule gewählt und erstreckt sich über 60° in Elevationsrichtung bzw. 2° in Azimutrichtung. Würde man die Apertur noch stärker aufweiten, müssten noch sehr viel mehr Strahlen verfolgt werden, die nur geringe Beiträge liefern, da sie nur die Nebenkeulen des Sonarsensors abtasten. Es ist klar, dass durch die Beschneidung der Apertur der ohnehin geringe Einfluss der Nebenkeulen weiter reduziert wird. Dies ist jedoch keine prinzipielle Einschränkung des Simulators, sondern nur ein Kompromiss, um die Rechenzeit und den Speicherbedarf zu reduzieren.

Die genannte Pixelauflösung der Apertur ergibt sich durch folgende Überlegungen, die durch Abbildung 8.8 veranschaulicht werden: Als Minimalanforderung möchte man am ersten beschallten Punkt am Ende der Nadirlücke eine Auflösung in der Größenordnung der Wellenlänge erreichen. Mit einer gewählten Nadirlücke von 9 Metern bei einer Flughöhe von 20 Metern ergibt sich ein Montagewinkel β_m von etwa 24° . Mit dem gewählten Aperturwinkel von 60° wird dann der Bereich von 9 bis etwa 189 Meter getroffen. Unter Berücksichtigung des in die Bodenebene projizierten azimutalen Öffnungswinkels erreicht man im Abstand von 9 Metern vom Nadir eine Strahlbreite von etwa 82 cm. Die Wellenlänge liegt unter Annahme einer Schallgeschwindigkeit von 1500 m/s und einer Frequenz von 400 kHz bei 3,75 mm. Daraus ergibt sich die Sonarapertur mit 218 Pixeln in Azimutrichtung. Aus dem Verhältnis der Öffnungswinkel und quadratischen Pixeln ergibt das 6538 Pixel in Elevationsrichtung. Höhere Auflösungen erfordern eine entsprechend größere Menge an Pixeln mit dem damit verbundenen höheren Rechenaufwand.

8.3.1.3 Trajektorien

Prinzipiell kann im Simulator jede Folge von 6D-Posen als Trajektorie verwendet werden. Zur Simulation einer Kurvenfahrt steht im Simulator eine Parabel-Trajektorie zur Verfügung, bei der sich im Brennpunkt besonders viele Messungen überlappen. Um die Betrachtung eines Objekts von allen Seiten simulieren zu können, wird eine Box-Trajektorie zur Verfügung gestellt, die aufgrund der harten 90° »Kurven« jedoch keinem realen AUV-Pfad entspricht. In Abbildungen 8.9 und 8.10 sind Szenengeometrien verschiedener Fälle gezeigt.

In Abbildung 8.11 ist eine resultierende Tiefenkarte aus dem Ankerminnenszenario aus Abbildung 8.10 gezeigt, die als Eingabe für den Akustikteil dient.

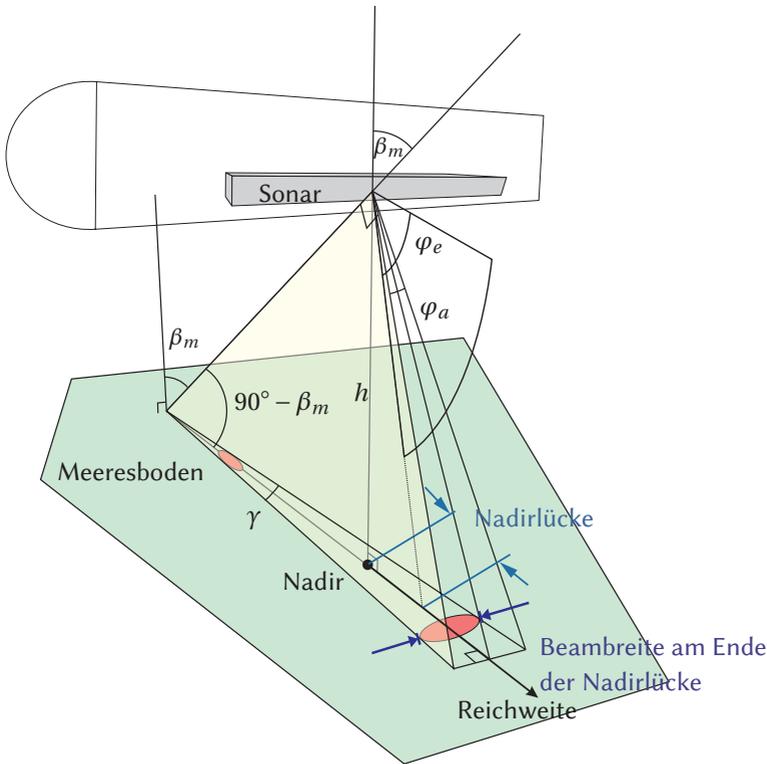


Abbildung 8.8: Geometrische Anordnung des Sonarsensors

8.3.2 Bodenmodellierung

Der für die Umfeldrekonstruktion wichtigste Fall ist die Simulation einer natürlichen Umgebung. Dazu wurde die Möglichkeit geschaffen, verschiedene Bodentypen zu modellieren, die jetzt beschrieben werden.

Es stehen verschiedene Terrain-Generatoren zur Erzeugung der 2,5D-Grundwahrheit zur Verfügung. Zum einen ein Generator, der Oberflächen aus Kernelfunktionen in Form von bivariaten Gaußglocken zusammensetzt und zum anderen spektrale Generatoren, die eine Oberflächen gemäß einer Frequenzverteilung erzeugen. Die hier gezeigten erzeugten Terrains haben eine Ausdehnung von $200\text{ m} \times 200\text{ m}$ bei $512\text{ Pixel} \times 512\text{ Pixel}$.

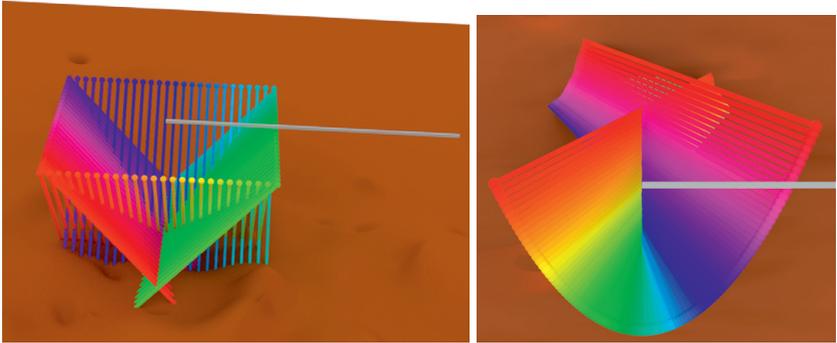


Abbildung 8.9: Überfahrten über ein Terrain mit Box-Trajektorie (links) und Parabel-Trajektorie (links). Wegpunkte sind durch farbige Kugeln dargestellt, die entlang der Trajektorie ihre Farbe wechseln. Aus diesen Kugeln zeigt ein gleichfarbiger Stab in die Richtung der Sonarhauptkeule. Der graue Stab dient als Orientierung und zeigt in Richtung der globalen x -Achse. Damit kann auch bei komplexeren Szenen leicht kontrolliert werden, wann welche Elemente aufgenommen werden. Bei sehr kleiner Schrittweite entlang der Trajektorie können sich die Kugeln und Stäbe in der Übersichtsdarstellung überlappen.

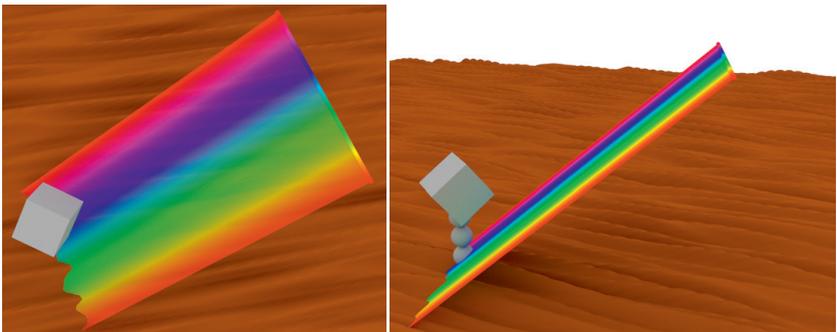


Abbildung 8.10: Aufnahmegeometrie eines Sandwellenterrains mit zusätzlichen 3D-Objekten, die eine Ankermine darstellen sollen. Die Daten werden entlang einer geradlinigen Vorbeifahrt gewonnen. Die Hauptkeule des Sonars zeigt ungefähr in Richtung der Ankermine.

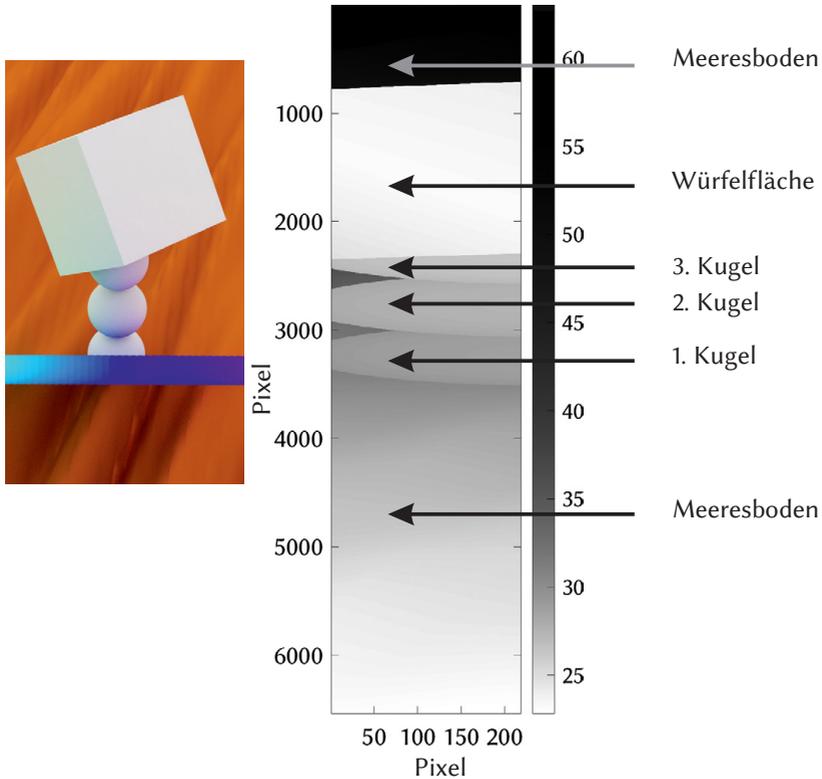


Abbildung 8.11: Tiefenkarte aus dem Raytracing-Schritt, zur besseren Sichtbarkeit leicht in die Breite gezogen. Gezeigt ist die Tiefenkarte für eine Sonaraufnahme aus der Szene aus Abbildung 8.10 mit dem Ankerminenobjekt. Links ist das Ankerminenobjekt aus Sicht des Sonars abgebildet. In cyan bis blau sind erneut die Trajektorienkugeln gezeichnet. Im Tiefenbild kann man die Kugeln der Ankermine erkennen, die sich vom Untergrund abheben sowie den starken Tiefenkontrast zwischen Würfelfläche und Boden.

Es wurde einer großen Geländegröße der Vorzug vor hoher örtlicher Auflösung gegeben, um im Rahmen der Rekonstruktion größere Flächen überstreichen zu können. Für die Oberflächenrauheit spielt dies keine Rolle, da diese erst im Akustikteil simuliert wird (Abschnitt 8.3.3.1).

Modellierung im Frequenzraum

Zur Erstellung der Terrains im Frequenzraum gemäß eines gewünschten Rauheitsspektrums wird wie folgt vorgegangen: Als Ausgangspunkt zur Erstellung eines Terrains $Z(x,y)$ dient ein Eingabebild $b(x,y)$ bestehend aus Rauschen mit konstantem Leistungsdichtespektrum. Dieses wird fouriertransformiert (\mathcal{F}) und über die Aufteilung in Real- und Imaginärteil die Repräsentationen in Betrag und Phase berechnet:

$$B(f_x, f_y) := \mathcal{F}\{b(x, y)\}, \quad B \in \mathbb{C}, \quad f_x, f_y \in \mathbb{R}, \quad (8.3)$$

$$\text{wird zu } B_R(f_x, f_y) := \Re\{B(f_x, f_y)\}, \quad (8.4)$$

$$\text{und } B_I(f_x, f_y) := \Im\{B(f_x, f_y)\}. \quad (8.5)$$

In Betrags- und Phasendarstellung ergibt sich also:

$$B_{\text{Mag}}(f_x, f_y) := \sqrt{(B_R(f_x, f_y))^2 + (B_I(f_x, f_y))^2} \quad (8.6)$$

$$\text{und } B_{\text{Ph}}(f_x, f_y) := \text{atan2}(B_I(f_x, f_y), B_R(f_x, f_y)), \quad (8.7)$$

wobei atan2 hier die Vierquadrantenversion des Arcustangens bezeichnet. Dann wird eine Multiplikation des Betragsspektrums mit der gewünschten Filterfunktion $H_{\text{mod}}(f_x, f_y)$ vorgenommen. Die Phase bleibt unverändert erhalten. Durch Fourier-Rücktransformation erhält man das gesuchte Terrain $Z(x,y)$:

$$\widehat{B}_{\text{Mag}}(f_x, f_y) := H_{\text{mod}}(f_x, f_y) \cdot B_{\text{Mag}}(f_x, f_y). \quad (8.8)$$

Die Rückumwandlung in Real- und Imaginärteil ergibt:

$$\widehat{B}_R(f_x, f_y) := \widehat{B}_{\text{Mag}}(f_x, f_y) \cdot \cos(B_{\text{Ph}}(f_x, f_y)), \quad (8.9)$$

$$\text{und } \widehat{B}_I(f_x, f_y) := \widehat{B}_{\text{Mag}}(f_x, f_y) \cdot \sin(B_{\text{Ph}}(f_x, f_y)), \quad (8.10)$$

was zu folgendem Ausdruck für die resultierende Höhenkarte des Terrains führt:

$$Z(x,y) = \mathcal{F}^{-1} \{ \widehat{B}_R(f_x, f_y) + i\widehat{B}_I(f_x, f_y) \}. \quad (8.11)$$

8.3.2.1 Inverses Potenzgesetz – fraktal-isotropes Terrain

Natürliches Terrain wird oft mithilfe eines inversen Potenzgesetzes beschrieben (siehe Abschnitt 7.7.5), weshalb auch in der vorliegenden Arbeit diese Beschreibung für ein fraktal-isotropes Terrain verwendet wird:

$$f_r = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}, \quad (8.12)$$

$$H_{\text{mod}}^{\text{iso}}(f_x, f_y) = \frac{1}{f_r^\beta}, \quad \text{mit } \beta \in [1,2]. \quad (8.13)$$

In dieser Arbeit wurde $\beta = 1,6$ verwendet, wenn nichts anderes angegeben ist. Ein Beispielterrain ist in Abbildung 8.12 gezeigt.

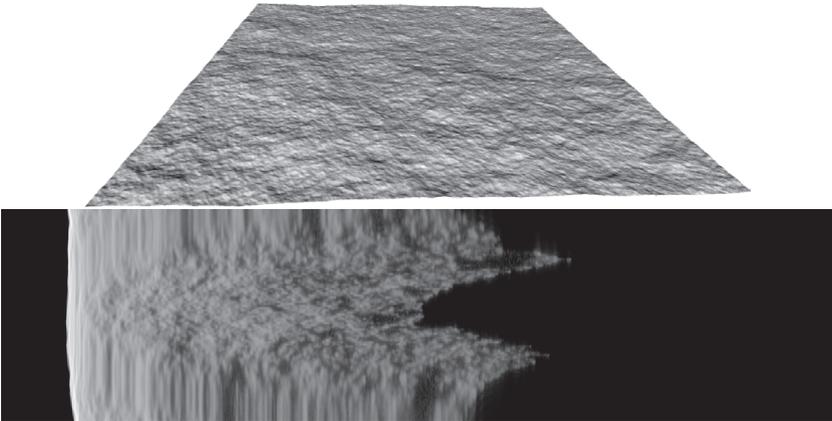


Abbildung 8.12: Terrain gemäß inversem Potenzgesetz aus dem Simulator in 3D-Schrägsicht (oben) und zugehörige simulierte rauschfreie Sidescan-Sonardaten (logarithmische Darstellung) bei parabelförmigem Überflug wie in Abbildung 8.9 (unten). Die Reichweite des Sonars ist höher als die Ausdehnungen des Terrain, was zur Schattenbildung in großer Entfernung führt (rechte Seite).

8.3.2.2 Erodierter Fels

Ähnlich zur isotropen Variante, kommt es bei Felsformationen oft vor, dass durch die vorherrschende Meereströmungsrichtung der Fels anisotrop erodiert ist. Dies kann durch Hinzunahme eines Anisotropieparameters α_a ähnlich wie in Linnett [Lin91] und Pailhas et al. [Pai09] modelliert werden:

$$H_{\text{mod}}^{\text{aniso}}(f_x, f_y) := \left(\sqrt{\alpha_a \cdot f_x^2 + f_y^2} \right)^{-\beta}, \quad \text{mit } \beta \in [1, 2]. \quad (8.14)$$

Ein mit diesem Modell erzeugtes Terrain ist in Abbildung 8.13 zu sehen. Auch hier wurde $\beta = 1,6$ verwendet.

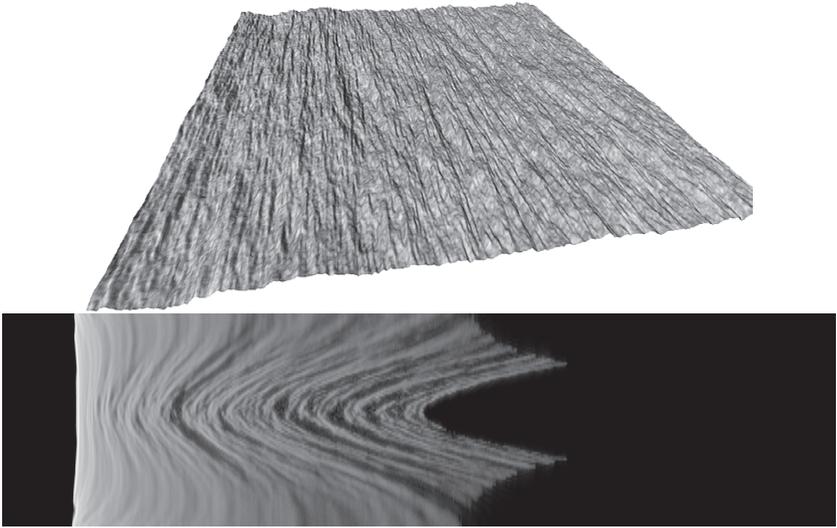


Abbildung 8.13: Erodierter-Fels-Terrain aus dem Simulator in 3D-Schrägsicht (oben) und zugehörige simulierte Sidescan-Sonardaten (logarithmische Darstellung) bei parabelförmigem Überflug (unten).

8.3.2.3 Sandwellen

Pailhas et al. [Pai09] schlagen folgendes $H_{\text{mod}}^{\text{sd}}(f_x, f_y)$ für Sandwellen vor:

$$H_{\text{mod}}^{\text{sd}}(f_x, f_y) := (f_x - f_{xp})^{-\beta} (f_y - f_{yp})^{-\beta}, \quad \text{mit } \beta \in [1, 2], \quad (8.15)$$

wobei r_{xp} und r_{yp} die Hauptfrequenzen der Wellen darstellen.

Lyons et al. [Lyo02] haben bei ihren Messungen von realem Meeresboden eine Frequenzanalyse eines mit Sandwellen bedeckten Meeresbodens gewonnen. Um diese aus natürlichem Terrain gewonnene Fouriertransformierte noch besser nachzubilden, wird in dieser Arbeit eine andere Sandwellen-

frequenzverteilung vorgeschlagen. Dazu wurde die in Lyons et al. [Lyo02] abgebildete Fouriertransformierte durch eine parametrisierte Funktionsform generalisiert. Als Basis diente der Verlauf einer um den Ursprung rotierten logarithmischen Normalverteilung:

$$H_{\text{mod}}^{\text{logn}}(f_x, f_y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma f_r(f_x, f_y)} \exp\left(\frac{-(\log f_r)^2}{2\sigma^2}\right). \quad (8.16)$$

Für die Stauchung wird ähnlich zu Abschnitt 8.3.2.2 ein Anisotropiefaktor α_a eingeführt, um den Grad der Anisotropie der Sandwellen einstellen zu können. Zusätzlich sollen auch die beiden Erhebungen nachgebildet werden, die in der Fouriertransformierten aus Lyons et al. [Lyo02] sichtbar sind. Anschließend wird diese Verteilung noch um den Winkel ζ rotiert, um die Wellen nicht parallel zu den Koordinatenachsen auszurichten. Das wird mit folgender Transformation erreicht:

$$f_{rd}(f_x, f_y) := \sqrt{(\cos\zeta f_x - \sin\zeta f_y)^2 + \alpha_a \cdot (\sin\zeta f_x + \cos\zeta f_y)^2}, \quad (8.17)$$

$$H_{\text{mod}}^{\text{sand}}(f_x, f_y) := \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma f_{rd}(f_x, f_y)} \exp\left(\frac{-(\log f_r(f_x, f_y))^2}{2\sigma^2}\right). \quad (8.18)$$

Man beachte die gleichzeitige Verwendung von f_r und f_{rd} .

Diese Frequenzverteilung wird im vorgestellten Simulator zur Erzeugung von Sandwellen verwendet und ist in Abbildungen 8.14 und 8.15 abgebildet.

Ein aus dieser Frequenzverteilung resultierendes Terrain ist in Abbildung 8.16 zusammen mit Sonarmessungen über diesem Terrain abgebildet.

8.3.2.4 Zufallskernel-Terrain (Random Kernel)

Nicht unbedingt als Modell einer natürlich vorkommenden Formation ist auch die Erstellung eines Terrains möglich, das aus zufällig platzierten Gaußkernen besteht, die zufällige Höhen (sowohl positive als auch negative) und Breiten besitzen. Dies hat den Hintergrund, dass das Terrain dann die gleiche erzeugende Funktion wie die Rekonstruktion besitzt. Dieser Generator arbeitet direkt im Ortsraum und addiert Terrains einzelner Kernel.

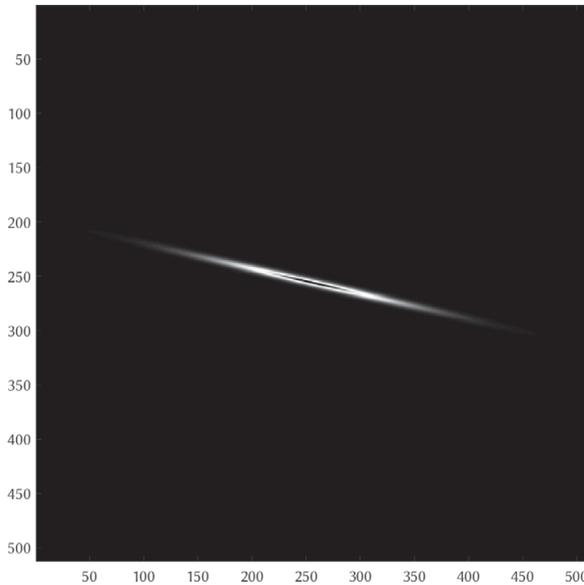


Abbildung 8.14: Betrag der Fourier-Transformierten des Sandwellen-Terrains. Der Konstantbeitrag befindet sich im Zentrum des Bildes.

Die Positionen der Kernel sind in dem Beispiel aus Abbildung 8.17 nicht gleichverteilt, sondern um den Mittelpunkt des Terrains herum gaußverteilt. Dies ist im Simulator einstellbar und wurde gewählt, damit dort, wo der Überflug simuliert wird, eine nichttriviale Bathymetrie vorhanden ist.

8.3.2.5 Mischformen

Es kann sinnvoll sein, mehrere Terrainformen zu mischen, wie beispielsweise eine additive Mischung von Sandwellen mit einem Zufallskernel-Terrain, das breite, »niederfrequente«, Kernels besitzt und damit eine Basis-Geländeform beschreibt. Eine andere sinnvolle Kombinationsmöglichkeit ist die, eine Geländesegmentierung vorzugeben und dann pro Segment den Untergrund zu simulieren. Dies wird beispielsweise im Simulator von Pailhas et al. [Pai10b] umgesetzt. Im vorliegenden Simulator besteht derzeit keine Kombinationsmöglichkeit verschiedener Terrains, könnte aber bei Bedarf einfach ergänzt werden.

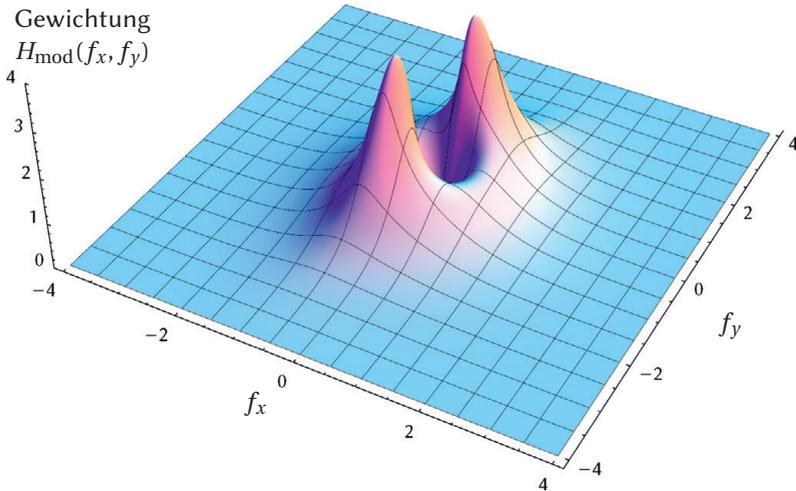


Abbildung 8.15: Ausschnittsvergrößerung und 3D-Darstellung der $H_{\text{mod}}^{\text{sand}}(f_x, f_y)$ -Funktion für das vorgeschlagene Sandwellenterrain. Deutlich erkennbar sind die zwei Erhebungen. Darstellung in normierten Frequenzkoordinaten.

8.3.3 Akustische Modellierung

8.3.3.1 Rauheit

Die Rauheit der Oberfläche im Geometrieteil explizit zu simulieren, würde eine Bodenmodellierung in der Größenordnung der Wellenlänge erfordern. Dies benötigt selbst für eine 2,5D-Höhenkartendarstellung enorm viel Speicher. Ein quadratisches Terrain mit 200 m Kantenlänge und 3 cm Auflösung erfordert bereits 1,7 GB Speicher bei einfacher Fließkommagenauigkeit allein für die Höheninformation. Dies beinhaltet noch keine Datenstruktur für das Raytracing. Daher wird die Rauheit erst im Sonarteil hinzugefügt, indem die Abstände der Einzelstrahlen mit normalverteiltem Rauschen kleiner Amplitude (in der Größenordnung der Wellenlänge) gestört werden. Dadurch entsteht dann das typische Speckle-Rauschen einer kohärenten Beleuchtung, wenn durch Superposition von Wellen Auslöschungen entstehen.

Diese Art der Modellierung hat außerdem den Vorteil, dass verschiedene Rauschinstanzen gewonnen werden können, ohne die Geometrieberechnungen erneut durchführen zu müssen.

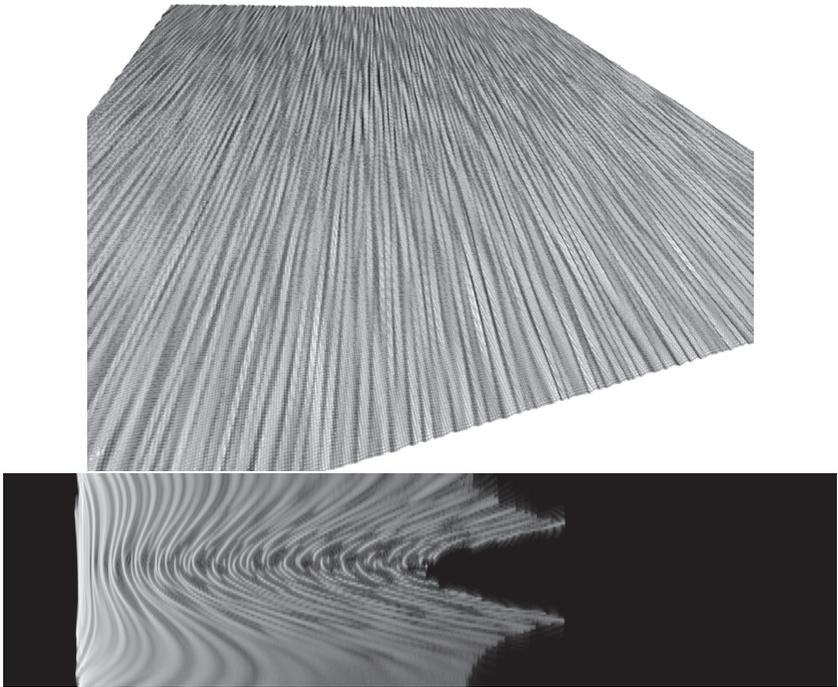


Abbildung 8.16: Sandwellen-Terrain aus dem Simulator in 3D-Schrägsicht (oben) und zugehörige simulierte Sidescan-Sonardaten (logarithmische Darstellung) bei parabelförmigem Überflug (unten).

8.3.3.2 Schallgeschwindigkeitsprofil

Da die Motivation dieser Arbeit von der Tiefsee herrührt, ist der Verzicht auf ein Schallgeschwindigkeitsprofil (Abschnitt 3.2.1) und damit die Annahme isotroper Schallausbreitung durchaus gängig (siehe Abschnitt 7.7.2) und nicht besonders einschränkend: Das Wasser in der Tiefsee ist bezüglich Temperatur und Salzgehalt recht homogen und damit auch hinsichtlich der Brechung. Da hier vorwiegend höherfrequente Systeme mit einer damit einhergehenden kurzen Reichweite untersucht werden, ist auch die Änderung des Drucks über den Arbeitsbereich des Sonars hinweg zu vernachlässigen.

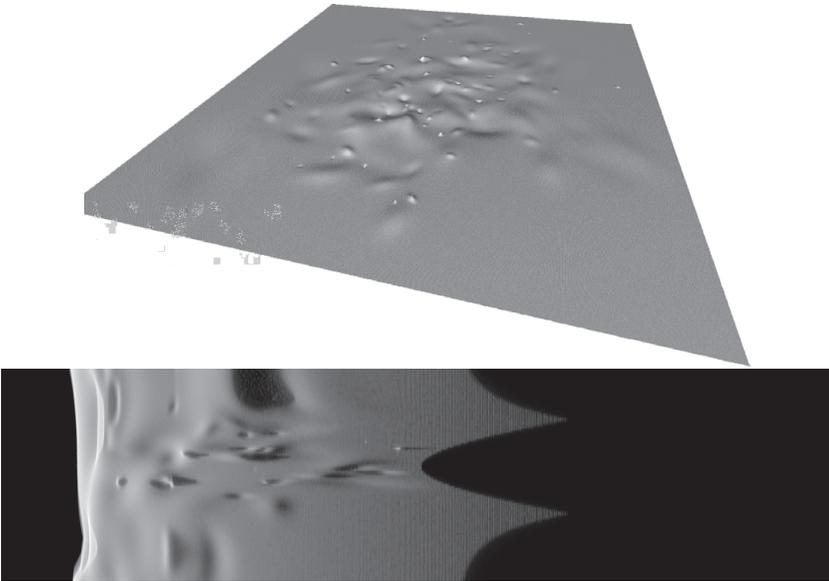


Abbildung 8.17: Random-Kernel-Terrain aus dem Simulator in 3D-Schrägsicht (links) und zugehörige simulierte Sidescan-Sonardaten (logarithmische Darstellung) bei parabelförmigem Überflug (unten). Gut ist hier auch der Layover-Effekt bei Erhebungen nahe des Nadir zu beobachten. Bei den vollständig ebenen Gebieten in großer Entfernung ist ein Quantisierungseffekt durch die Anzahl der Strahlen sichtbar.

8.3.3.3 Frequenzwahl

Die Frequenz des simulierten Sonarpulses kann im Prinzip frei gewählt werden und liegt für kartierende Sidescan-Sonare typischerweise zwischen 100 und 500 kHz. Als Standardwert der Simulation wurden 400 kHz gewählt. In der Praxis hängt die Wahl der Frequenz von der gewünschten Eindringtiefe (siehe Abschnitt 4.2.4) und dem frequenzabhängigen Rückstreuverhalten ab. Da die Eindringtiefe nicht mitmodelliert wird, die Rückstreuung auch frequenzunabhängig modelliert ist und die Absorption nicht berücksichtigt wird, hat die Wahl der Frequenz in der Simulation nur Auswirkungen auf das Auflösungsvermögen und den Speckle.

Da in der Praxis bei Nahbereichssonaren durchaus schon Wandler mit 1 MHz und mehr vorkommen (siehe Abschnitt 6.3.6), wurde die Abtastfrequenz des Sonars zu 2 MHz gewählt, um auch feiner auflösende Sensoren modellieren zu können. Bell [Bel95] verwendet eine deutlich niedrigere Frequenz wegen der schmalen Bandbreite des dort simulierten Sonarsystems. Dadurch ist eine Unterabtastung möglich, ohne die Abtastbedingung zu verletzen. Da in dieser Arbeit auch breitbandige Sonarsignale simuliert werden sollen und Rechenzeitoptimierung nicht im Vordergrund stand, wird auf eine derartige Modellierung verzichtet.

8.3.3.4 Pulsformen

Eigenschaften unterschiedlicher Pulsformen

Eine sehr ausführliche Abhandlung über verschiedenen Pulsformen bei Sonarsensoren wird in Ainslie [Ain10] gegeben. Das in der vorliegenden Arbeit modellierte Sonar kann sowohl Pulse konstanter Frequenz (CW) als auch frequenzmodulierte Pulse (FM) aussenden. Durch die Pulsform und Pulslänge werden Bandbreite, Auflösungsvermögen und Signal-zu-Rausch-Verhältnis beeinflusst. Diese Pulsformen werden im Folgenden vorgestellt.

Continuous-wave (CW)

Der CW-Puls ist der klassische Operationsmodus eines Sidescan-Sonars. Hier emittiert der Sonarsensor ein sinusförmiges Signal bestehend aus einigen Perioden, mithin ein Signal konstanter Frequenz (siehe Abbildung 8.18). Die Anzahl der Perioden pro Puls kann im Simulator gewählt werden. Standardmäßig sind 10 Perioden eingestellt. Dies ist ein realistischer Wert, z. B. verwendet Waite [Wai02] ähnliche Werte. Dies lässt sich für eine Frequenz f_0 so schreiben:

$$x(t) = \begin{cases} \sin(2\pi f_0 t) & \text{für } f_0 t \in [0,10], \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} \quad (8.19)$$

Bezüglich des Begriffes CW gibt es auch andere Auffassungen, insbesondere aus dem Radarbereich: Dort wird nur ein pausenlos sendendes Sonar als CW bezeichnet [Ric10]. Im Folgenden soll unter CW ein gepulstes Sonar konstanter Frequenz verstanden werden.

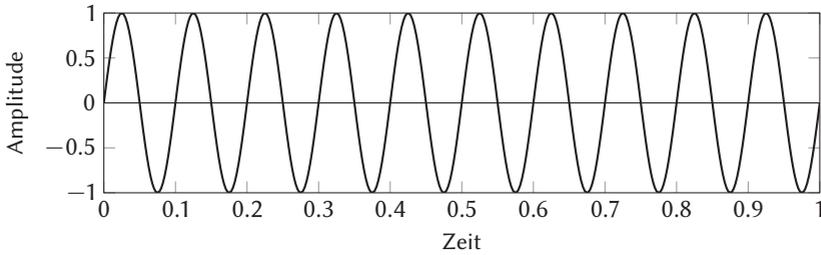


Abbildung 8.18: Sinusförmiger CW-Puls in normalisierter Zeit-/Amplitudendarstellung

Auflösung des CW-Pulses

Die Entfernungsauflösung ist über die Pulsdauer τ und die Schallgeschwindigkeit c definiert [Ric05]: Wird ein Puls mit Pulsdauer τ ausgesendet, dann wird zum Zeitpunkt t_0 ein Streuzentrum (engl. *scatterer*) im Abstand von $\frac{ct_0}{2}$ vom Anfang des Pulses getroffen. Durch die Länge des Pulses werden aber Streuzentren im Abstand von $\frac{c(t_0-\tau)}{2}$ beschallt und von diesen auch Echos empfangen. Damit tragen Streuzentren, die über $\frac{c\tau}{2}$ verteilt sind, gleichzeitig zum empfangenen Signal bei (Abbildung 8.19). Da zwei Streuzentren sich nur dann unterscheiden lassen, wenn sie weiter als $\frac{c\tau}{2}$ entfernt sind, nennt man die Größe $\frac{c\tau}{2}$ auch Entfernungsauflösung (engl. *range resolution*). Das Bandbreiten-Zeit-Produkt BT eines Pulses ist definiert als

$$BT = B_s \tau, \quad (8.20)$$

und macht eine Aussage über das Auflösungsvermögen des Sonarsystems, wobei B_s die Rayleigh-Bandbreite des Pulses darstellt. Das ist die Bandbreite im Frequenzbereich vom Maximum zur nächstliegenden Nullstelle [Ric10]. Beim CW-Puls gilt damit für die Bandbreite, dass sie invers proportional zur Pulslänge [Ric10] ist. Damit gilt dann, dass BT gleich eins ist:

$$B_s = \frac{1}{\tau} \quad (8.21)$$

$$BT = 1. \quad (8.22)$$

Die Anzahl der Perioden eines Pulses stellt einen Kompromiss zwischen der eingebrachten Energiemenge ins Wasser und der zeitlichen Unschärfe dar.

Je kürzer der Puls, desto besser die zeitliche Auflösung. Allerdings müssen die Empfänger eine hohe Empfindlichkeit aufweisen, um die schwachen Signale noch mit ausreichendem Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR) empfangen zu können.

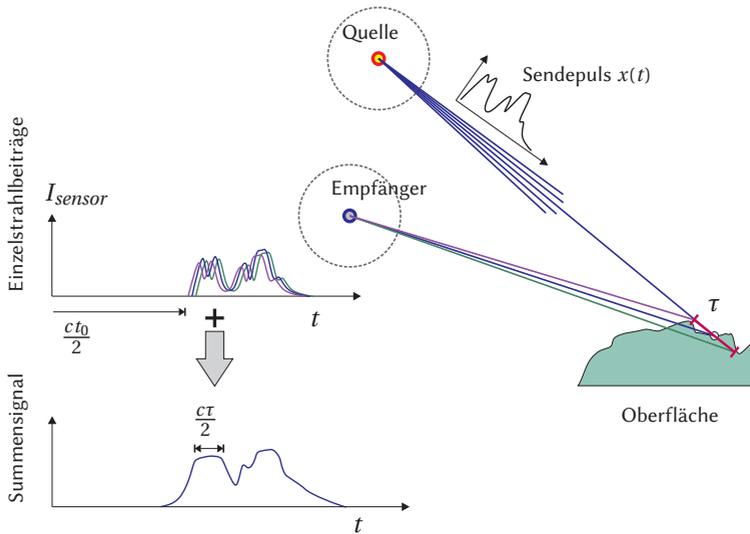


Abbildung 8.19: Die Auflösung ist bedingt durch die Pulslänge τ , da eine Verschmierung der Sonarantwort durch mehrere Streuzentren innerhalb der Pulslänge stattfindet.

Frequenzmodulierte Pulse (FM)

In modernen Sonaren werden daher zunehmend frequenzmodulierte Pulse (FM-Pulse), sog. *chirps* oder *sweeps* als Sendesignal verwendet. Man stößt bei ultrakurzen CW-Pulsen zum einen an Grenzen, was die Belastbarkeit der Keramikelemente angeht, zum anderen verhindert die Kavitation des Wassers (siehe Abschnitt 3.4.2.2) den Eintrag immer größerer Energiemengen. Durch die Verwendung von Breitbandsignalen ist auch eine geringere Störanfälligkeit gegenüber monofrequenten Störschallquellen gegeben, wie z. B. Echolote oder Transponder.

Bei den breitbandigen FM-Pulsen erfolgt der Energieeintrag ins Wasser über einen – verglichen mit CW-Pulsen – längeren Zeitraum, wodurch mehr Schallenergie gesendet werden kann. Um durch die längeren Pulse eine Ver-

schlechterung der Auflösung zu vermeiden, wird beim Empfang durch Demodulation mit dem gleichen Signal (Pulskompression bzw. Matched Filtering) eine erhebliche Verbesserung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses erreicht.

FM-Pulse erreichen auch eine bessere Entfernungsauflösung als $\frac{cT}{2}$ [Ric05]: Der linear frequenzmodulierte Puls (LFM-Puls) hat die Bandbreite B_s des überstrichenen Frequenzbereichs. Je höher das BT des linearen Chirps ist, desto mehr nähert sich die Frequenzverteilung einer Gleichverteilung an und umso schärfer wird der Matched-Filter- bzw. Autokorrelationspeak des Signals.

Die Auflösung wird deutlich besser als τ , da die 3 dB-Breite des Autokorrelationspeaks des LFM-Pulses in etwa mit $1/B_s$ schrumpft [Ric05]. Es ist allerdings zu beachten, dass der Autokorrelationspeak Nebenmaxima besitzt. Beim LFM-Puls sind daher Pulslänge und Bandbreite (im Gegensatz zum CW-Puls) voneinander entkoppelt.

Das maximal erreichbare SNR beim Matched-Filter hängt nur von der Energie der gesendeten Welle ab, nicht von anderen Dingen wie z.B. der Modulation, vorausgesetzt, es wird immer mit dem zugehörigen Matched-Filter gearbeitet [Ric05].

Der Nachteil von Chirps ist, dass länger gesendet werden muss und in dieser Zeit kein Empfang stattfinden kann. Baldacci et al. [Bal06] erwähnen, dass sich die synthetisch erzeugten Sendesignale in der Praxis von dem tatsächlich übermittelten Signal aufgrund von Umwelteinflüssen und Art der Quelle stark unterscheiden können.

Ein linearer Chirp mit Momentanfrequenz $f(t) = f_0 + \kappa t$ mit $\kappa = \frac{B_s}{\tau}$ kann folgendermaßen geschrieben werden:

$$x(t) = \sin \left(2\pi \int_0^t (f_0 + \kappa s) ds \right) = \sin \left(2\pi \left(f_0 t + \frac{\kappa}{2} t^2 \right) \right), \quad (8.23)$$

wobei f_0 die Grundfrequenz bezeichnet und κ die Stärke des Frequenzanstiegs.

Der lineare Chirp kann als Bandpasssignal auch in Form eines äquivalenten Tiefpass-Signals im Basisband dargestellt werden [Hei03a; Ric05]. Im hier vorgestellten Simulator kann auch direkt diese Basisband-Formulierung des Chirps als Sendesignal gewählt werden. Dadurch kann man die Rechenzeit des Tiefpassfilters sparen, erhält aber auch ein klareres Bild, weil die

Schmutzeffekte durch Speckle und die Filterung wegfallen, was unerwünscht sein kann. Im Wesentlichen wird dadurch das Auflösungsvermögen des Pulses simuliert.

Ein linearer Chirp ohne Amplitudenmodulation kann im Basisband wie folgt beschrieben werden [Ric05]:

$$x(t) = \cos(\pi\kappa t^2). \quad (8.24)$$

Dieses Signal ist in Abbildung 8.20 dargestellt. Gängig ist auch die Darstellung im Komplexen, etwa wie in Richards [Ric05]:

$$x(t) = a(t) \exp(i|\Omega t + \varphi(t)|), \quad (8.25)$$

wobei Ω die Trägerkreisfrequenz bezeichnet, $a(t)$ die Amplitudenmodulation des Trägers und $\varphi(t)$ die Modulation von Frequenz und Phase.

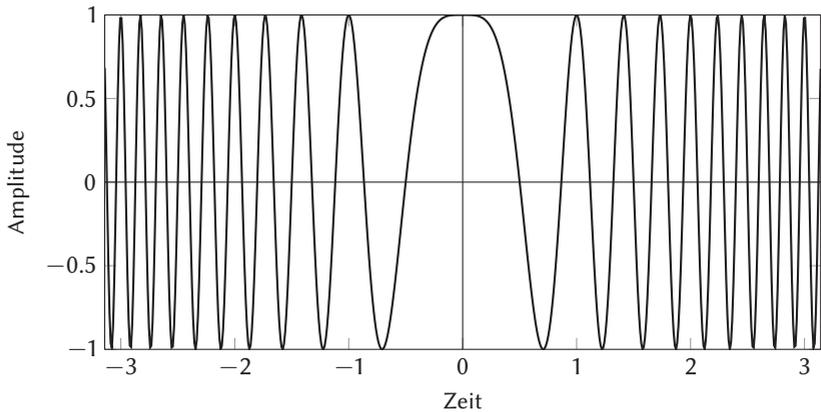


Abbildung 8.20: Äquivalentes Tiefpass-Signal des linearen Chirps in normalisierter Zeit-/Amplitudendarstellung mit $\kappa = 2$ im Bereich von $-\pi$ bis π .

Die komplexe Einhüllende nach der Demodulation ins Basisband ist durch

$$x(t) = a(t) \exp(i\varphi(t)) \quad (8.26)$$

beschrieben. Die Druckamplitude über der Zeit ist für einen linearen Chirp in Abbildung 8.21 dargestellt.

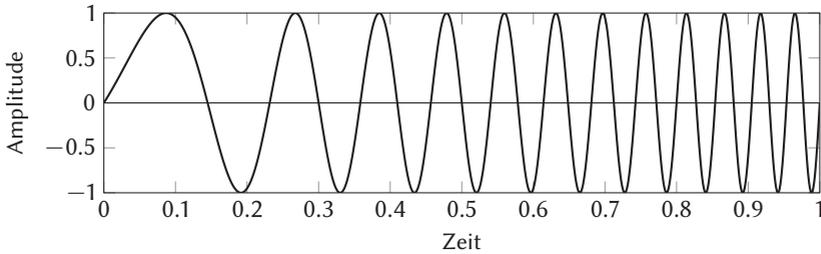


Abbildung 8.21: Linearer Chirp in normalisierter Zeit-/Amplitudendarstellung

Um aus den empfangenen, überlagerten FM-Signalen die Einzelbeiträge zu berechnen, wird eine sog. Pulskompression (Matched-Filter) durchgeführt, bei der das empfangene Signal mit dem (bekannten) zeitlich invertierten und konjugierten Sendesignal gefaltet wird. Es bilden sich an den Empfangszeitpunkten der Echos scharfe Maxima aus. Durch den integralen Charakter der Faltung

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(s)x^*(t-s) ds, \quad (8.27)$$

werden die Pulse auch im starken Rauschen gefunden. Dies ist in Abbildung 8.22 dargestellt.

Werden bei FM-Pulsen sehr lange Pulse (1 s–10 s) verwendet, müssen die Plattformstabilität und die Umgebungsbedingungen während der Sendezeit so stabil bleiben, dass die Korrelationsverluste akzeptabel bleiben [Wai02]. Die Art der Frequenzmodulation ist nicht zwingend linear, es werden bei Radar und Sonar auch exponentielle und hyperbolische Chirps eingesetzt. Ein exponentieller Chirp mit exponentiell ansteigender Momentanfrequenz $f(t) = f_0 \kappa^t$ kann folgendermaßen beschrieben werden:

$$x(t) = \sin \left(2\pi f_0 \int_0^t \kappa^s ds \right) = \sin \left(2\pi f_0 \frac{\kappa^t - 1}{\ln(\kappa)} \right). \quad (8.28)$$

Abbildung 8.23 zeigt die Druckamplitude über der Zeit für einen exponentiellen Chirp.

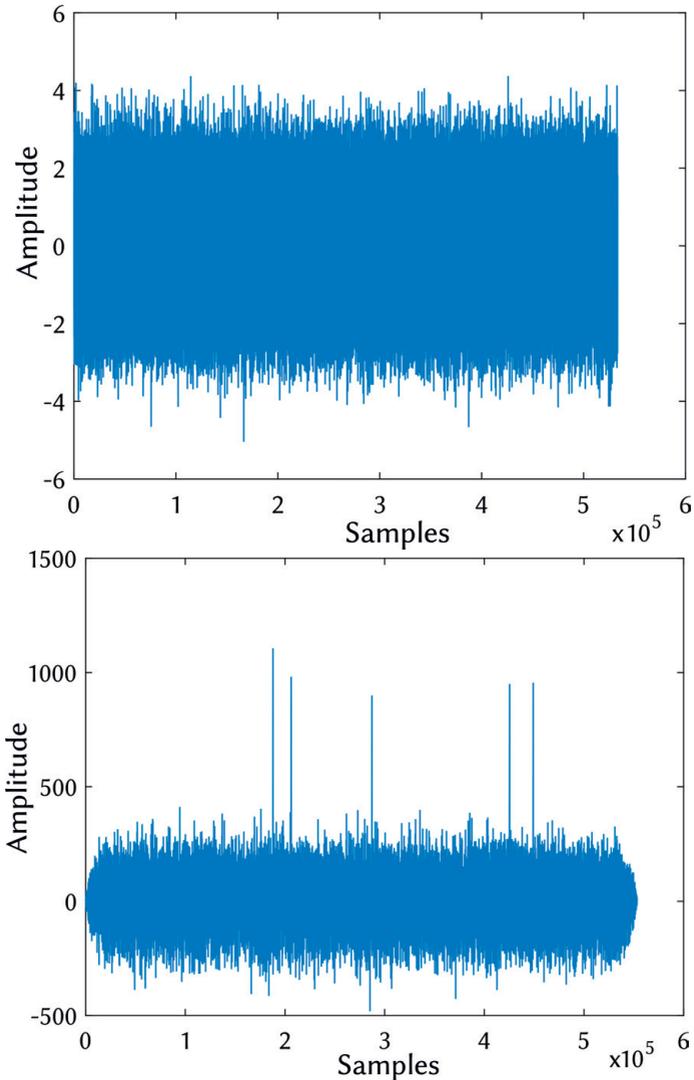


Abbildung 8.22: *Oben:* Fünf (ungefensterte) lineare Chirps mit normierter Amplitude 1,0 und Pulsdauer 10 ms sind zu einer Messung über 267 ms (entsprechend 200 m Reichweite) addiert. Die Messung besteht aus Rauschen mit standardnormalverteilter Amplitude. Die Chirps gehen im Rauschen vollständig unter. *Unten:* Nach der Pulskompression (Matched-Filterung) sind die Stellen, an denen sich die Chirps befinden, klar als Peak erkennbar.

Hyperbolische Chirps haben den Vorteil, dass sich die Periodizität des Pulses linear mit der Zeit ändert, so dass durch den Dopplereffekt verschobene Frequenzen mit einem geeignet verlängerten Referenzsignal korrelieren [Wai02]:

$$x(t) = t^{-\alpha} \exp(i2\pi s \log t). \tag{8.29}$$

Dabei stellt $s = \frac{t\dot{\varphi}(t)}{2\pi}$ den sog. Mellin-Parameter dar, der als hyperbolische Modulationsrate gesehen werden kann [Fla11].

In der hier vorgestellten Simulationsumgebung wird dem Nutzer die Möglichkeit gegeben, statt linearen Pulsen auch exponentielle Pulse einzusetzen.

Die Chirps werden im Allgemeinen mit einer Fensterfunktion (z. B. Blackman-Harris) multipliziert um günstigere Eigenschaften im Frequenzbereich zu erreichen. Dies wird im folgenden Abschnitt erklärt.

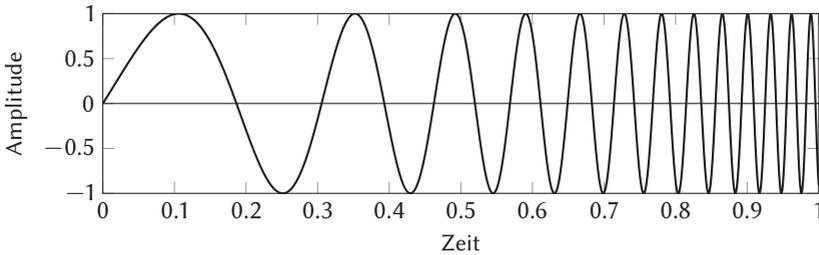


Abbildung 8.23: Exponentieller Chirp in normalisierter Zeit-/Amplitudendarstellung

Fensterung (Windowing)

Wird ein zeitlich begrenztes Signal erzeugt, indem ein Teil durch die Rechteckfunktion aus einem zugrunde liegenden Signal ausgeschnitten wird, hat das im Frequenzbereich meist unerwünschte Auswirkungen: Die Fouriertransformierte der Rechteckfunktion ist die sinc-Funktion, die im Frequenzbereich nur langsam abklingt und unendlich ausgedehnt ist. Durch die Fensterung eines Signals, können diese Effekte abgemildert werden.

In der Implementierung dieser Arbeit wurden symmetrische Blackman-Harris-Fenster²⁶ w_{BH} und Flat-Top-Blackman-Harris-Fenster w_{BHFT} verwen-

²⁶ <http://de.mathworks.com/help/signal/ref/blackmanharris.html> abgerufen am 01.10.2015

det. Für eine Zeitdiskretisierung $t = n \cdot \delta t$ mit $n \in 0, \dots, N$ ist ein diskretes Blackman-Harris-Fenster der Länge N folgendermaßen definiert:

$$w_{BH}(n) = a_0 - a_1 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) + a_2 \cos\left(\frac{4\pi n}{N-1}\right) - a_3 \cos\left(\frac{6\pi n}{N-1}\right), \quad (8.30)$$

mit den Parametern

$$a_0 = 0,35875, \quad a_1 = 0,48829, \quad a_2 = 0,14128, \quad a_3 = 0,01168.$$

Eine Flat-Top- oder Tapered-Fensterfunktion verringert die Amplitudenreduktion im Austausch gegen eine leicht breitere Antwort im Frequenzbereich [Hei02b]. Da die korrekte Amplitudenbestimmung in der Simulation wichtiger ist, wird eine Verschlechterung in der Frequenzantwort in Kauf genommen. Für seine Beschreibung in der Länge N mit Flat-Top-Anteil $0 < k_{FT} < 1$ wird ein Blackman-Harris-Fenster w' der Länge $(1 - k_{FT})N$ benötigt:

$$w_{BHFT}(n) = \begin{cases} w'(n) & \text{für } n \leq \frac{(1 - k_{FT})N}{2} \\ 1 & \text{für } \frac{(1 - k_{FT})N}{2} < n < \frac{(1 + k_{FT})N}{2} \\ w'(n - k_{FT}N) & \text{für } n \leq \frac{(1 + k_{FT})N}{2} \end{cases}. \quad (8.31)$$

Ein solches Flat-Top-Blackman-Harris-Fenster ist in Abbildung 8.24 abgebildet. Die Fensterung wirkt sich auf das Spektrum des Chirps aus: Der Gibbs-Effekt (engl. *ringing*) an den Bandgrenzen ist beim gefensternten Chirp aus Abbildung 8.26 nicht mehr vorhanden. Dies wird allerdings erkauft durch die schmalere Bandbreite. Ein Vergleich der Spektren für den ungenfensterten und gefensternten Fall ist in Abbildung 8.25 abgebildet.

Eine Übersicht über verschiedene Kombinationen von Fensterfunktionen und Chirps ist in Gutowski et al. [Gut02] gegeben.

Speckle-freie Modellierung

Zusätzlich zu den tatsächlich verwendeten CW- und FM-Pulsen bietet die Simulation die Möglichkeit einer rauschfreien Modellierung. Dazu wird für jeden Puls ein gefensterter Rechteckpuls (also direkt eine Fensterfunktion)

gesendet und empfangen. Dadurch wird der auflösungsmindernde Effekt der Pulslänge abgebildet, aber sämtliche anderen Effekte treten nicht auf. Die Fensterfunktion vermeidet Treppenbildung im Intensitätsbild, wie es mit einem Rechteckpuls passieren würde, wenn Bereiche nur von wenigen Strahlen getroffen werden. Diese Art der Modellierung hat zwar keine Entsprechung in einer bei einem realen Sensor ausgeführten Wandlerbewegung, ist aber wichtig, um rauschfreie Referenzsonarantworten zu erzeugen, wie sie im kernelbasierten Rekonstruktionsverfahren in Abschnitt 9.4.3 verwendet werden.

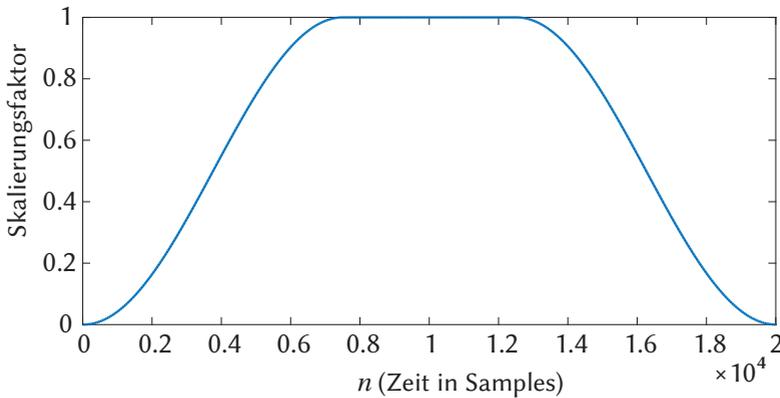


Abbildung 8.24: Flat-top Blackman-Harris-Fenster w_{BHFT} der Länge 20000 mit Anteil des flat-top von $k_{FT} = 1/4$ der Fensterlänge.

Weitere Pulsformen

Wie in der Mobilfunktechnik können natürlich auch Modulationstechniken aus dem Bereich CDMA (Code Division Multiple Access) wie beispielsweise Gold-Codes oder auch pseudo-zufällige (engl. *pseudo-random number*, *PRN*) Codes zum Einsatz kommen [Sho98]. Die PRN Codes sind ebenfalls breitbandig [Wai02]. Außerdem verbinden codierte Pulse die Vorteile von CW und FM, indem sie gleichzeitig gute Doppler- und gute Entfernungsauflösung bieten [Wai02]. In der Simulationsumgebung werden derzeit keine codierten Pulse betrachtet, könnten aber mit vertretbarem Aufwand hinzugefügt werden.

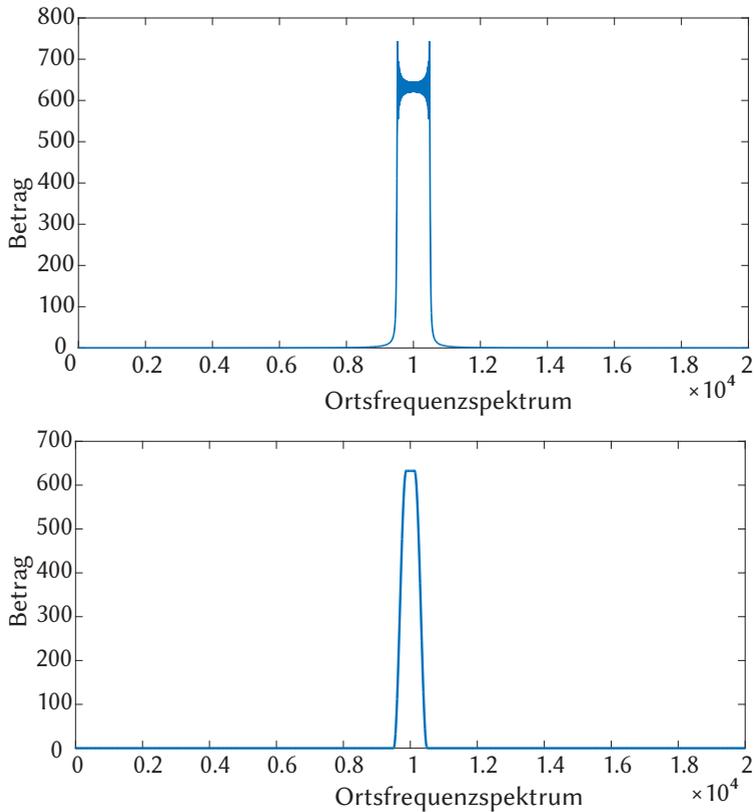


Abbildung 8.25: Frequenzverteilung im ungefensterten linearen Chirp (oben) verglichen mit der gefensterten Variante (unten). Deutlich sichtbar ist der Gibbs-Effekt (*»ringing«*) an den Bandgrenzen im ungefensterten Chirp. Dieser Effekt ist beim gefensterten Chirp nicht mehr vorhanden, allerdings erkauft durch die schmalere Bandbreite (unten).

8.3.3.5 Richtcharakteristik

Um der Antennencharakteristik des Sonars Rechnung zu tragen, wird in die Pixelebene des Sensors noch eine entsprechende Intensitätsmaske eingebracht, die die dreidimensionale Richtcharakteristik des Sonars abbildet. Die Erzeugung dieser Charakteristik wird im Folgenden hergeleitet.

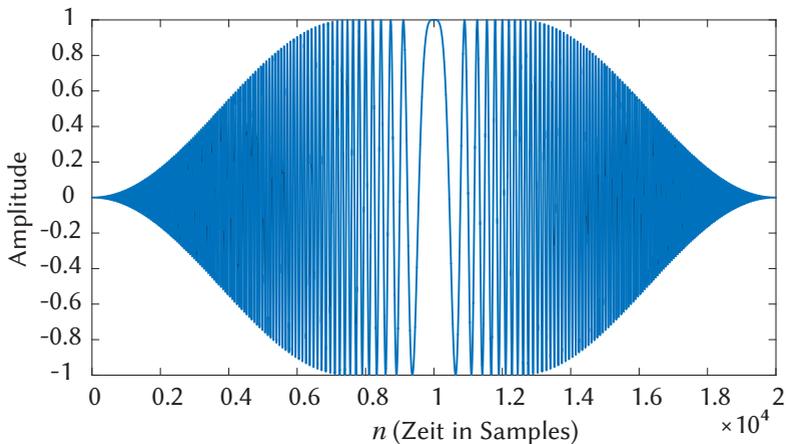


Abbildung 8.26: Mit dem Flat-Top-Blackman-Harris-Fenster gefensterter Chirp im Basisband. Der zugrundeliegende Chirp hat ein Bandbreiten-Zeit-Produkt von 1000.

Designparameter

Die Modellierung des Sonarsensors ging von typischerweise in der Praxis anzutreffenden Öffnungswinkeln aus. Als Designfrequenz f wurden 400 kHz angenommen. Die Wellenlänge ergibt sich dann mit $\lambda = c/f$ zu 0,00375 m entsprechend 3,75 mm. Im Azimutwinkel φ_a wird 1° und für den Elevationswinkel φ_e wird 50° als Öffnungswinkel gefordert, was typisch für gängige Sidescan-Sonare ist. Der Öffnungswinkel wird, wie durchaus üblich, über den *half power point (HPP)* definiert [Bel95]. Die 3 dB Strahlbreite ist der Winkel φ_η innerhalb dessen die abgestrahlte Leistung höchstens auf die Hälfte abgesunken ist und es gilt $\varphi_\eta = \eta \cdot \frac{1}{7}$ rad [Hei03a], wobei sich der Wert für η nur numerisch zu $\eta \approx 0.88589$ bestimmen lässt. Damit muss der Transducer folgende Abmessungen besitzen:

$$l_x = \eta \cdot \frac{\lambda}{\varphi_a} \approx 190 \text{ mm}, \quad (8.32)$$

$$l_y = \eta \cdot \frac{\lambda}{\varphi_e} \approx 3,8 \text{ mm}. \quad (8.33)$$

Richtfaktor und Richtmaß

Der einheitenlose Richtfaktor Γ_p , also die relative emittierte Druckamplitude in der Richtung parametrisiert durch die Raumwinkel φ_a und φ_e , ist für eine ideale Rechteckmembran gegeben durch [DEG06; Lur10]:

$$\Gamma_p(\varphi_a, \varphi_e) := \frac{\sin(\frac{kl_x}{2} \cos \varphi_a)}{\frac{kl_x}{2} \cos \varphi_a} \frac{\sin(\frac{kl_y}{2} \cos \varphi_e)}{\frac{kl_y}{2} \cos \varphi_e} = \text{si}(\frac{kl_x}{2} \cos \varphi_a) \text{si}(\frac{kl_y}{2} \cos \varphi_e), \quad (8.34)$$

$$\text{mit } \text{si}(x) := \frac{\sin(x)}{x}, \quad (8.35)$$

wobei $k = 2\pi f/c$ die Wellenzahl angibt.

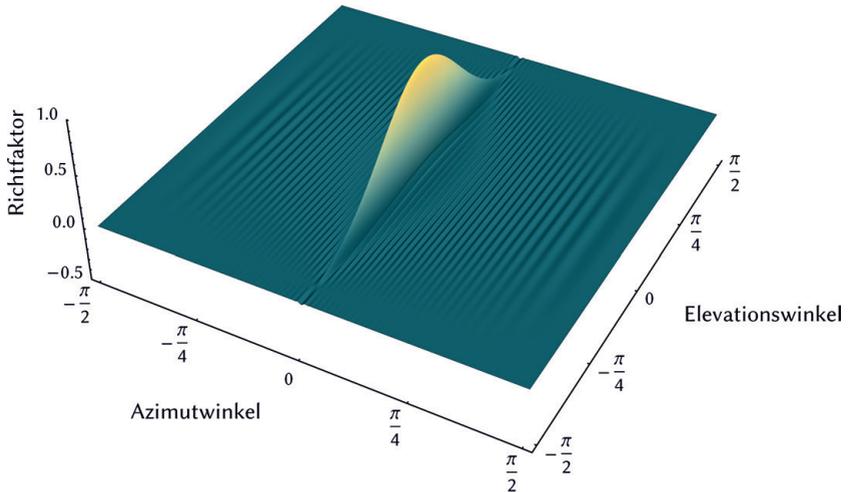


Abbildung 8.27: Richtfaktor Γ_p über den Öffnungswinkeln φ_a und φ_e des Sonars von $-\pi/2$ bis $\pi/2$.

Der Richtfaktor für den modellierten Sonarsensor ist in Abbildung 8.27 dargestellt. Da das Raytracing jedoch mittels eines virtuellen Flächensensors durchgeführt wird, muss die Betrachtung in der Bildebene erfolgen. Durch gnomonische Projektion (siehe Abbildung 8.28) erhält man den Richtfaktor für die Bildebene wie in Abbildung 8.29 dargestellt.

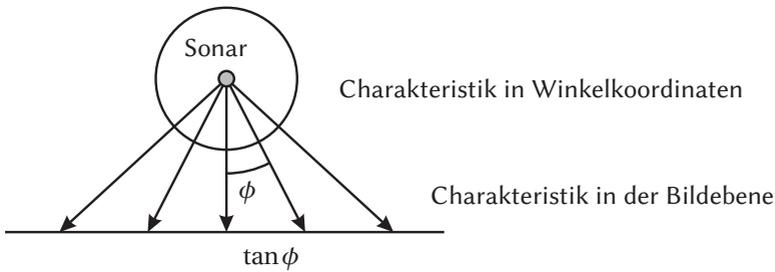


Abbildung 8.28: Die Antennencharakteristik in Winkelkoordinaten wird durch gnomonische Projektion auf die Bildebene abgebildet.

Diese Verteilung wird an jedem Pixel des virtuellen Kamerasensors ausgewertet und beschreibt sowohl den ausgehenden Schalldruck des Signals als auch die Empfindlichkeit des Empfängers. Der Richtfaktor beschreibt also die Druckdomäne, die Intensitäten werden durch das korrespondierende Richtmaß DI wiedergegeben. Es ist laut [DEG06; Bel95] gegeben zu:

$$DI := 10 \log_{10} |\Gamma_p|^2 = 20 \log_{10} |\Gamma_p|. \quad (8.36)$$

Das Richtmaß für den Azimutwinkel und den Elevationswinkel der modellierten Sonarantenne ist in Abbildung 8.30 dargestellt. Die Verteilung über die Pixelebene des Sensors ist in Abbildung 8.31 und in Abbildung 8.32 zu sehen.

Beam steering

In dieser Arbeit werden *keine* Wandlergruppen (engl. *arrays*) betrachtet. Durch entsprechend gewichtete Addition und zeitliche Staffelung der Signale der Einzelwandler kann die Richtcharakteristik einer Wandlergruppe geschwenkt werden (engl. *beam steering*). Prinzipiell kann in den Simulator jedoch eine beliebige resultierende Richtcharakteristik, auch die einer Wandlergruppe, eingespeist werden. Im Folgenden findet aber nur die Betrachtung einer einzelnen Rechteckmembran statt.

Da der Wandler das Signal sendet und empfängt, kommt das Richtmaß zweimal zum Tragen, d.h. das letztlich wirkende Richtmaß ist $DI_{\text{final}} = 2DI$. Diese Verstärkung ist die konstante Maske, die auf die Pixel bei der Berechnung der Sonarantwort angewendet wird. Diese Maske ist in Abbildung 8.33 gezeigt.

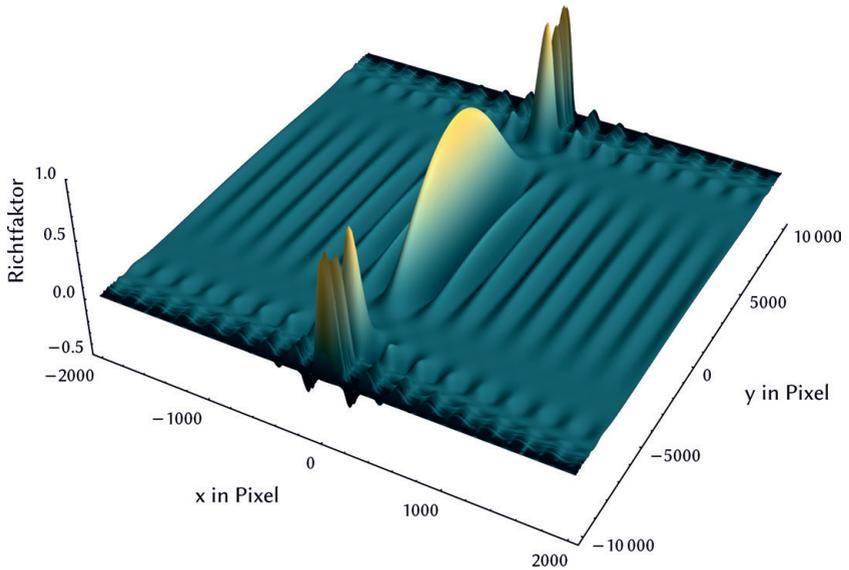


Abbildung 8.29: Richtfaktor Γ_p über der Bildebene.

Nahfeld und Fernfeld

Die Definitionen für den Richtfaktor und das Richtmaß gelten für die normalerweise durchgeführte Fernfeld-Betrachtung (Fraunhofer-Region), die je nach Definition ab einem Abstand $r_{fern} = l_x^2/\lambda$ bzw. oftmals ab $r_{fern} = 2l_x^2/\lambda$ angesetzt wird, wobei l_x die Antennenlänge angibt [Ric05][Lur10]. Bei einem Sonar wie in obiger Rechnung mit Antennenlänge $l_x = 19$ cm und Frequenz 400 kHz (Wellenlänge 0.375 cm bei 1500 m/s Schallgeschwindigkeit) beginnt das Fernfeld also in der Region von 10–19 m. Der Abstand, ab dem keine Oszillationen mehr möglich sind und die Druckamplitude monoton abfällt, d. h. das Ausbreitungsmuster voll ausgeformt ist, ist $r_{nooszi} = l_x^2/4\lambda$, also in obigem Beispiel ab ca. 2,4 Metern. Daher ist die Vernachlässigung des Nahfeldes vertretbar und es findet ausschließlich die Fernfeldapproximation Anwendung.

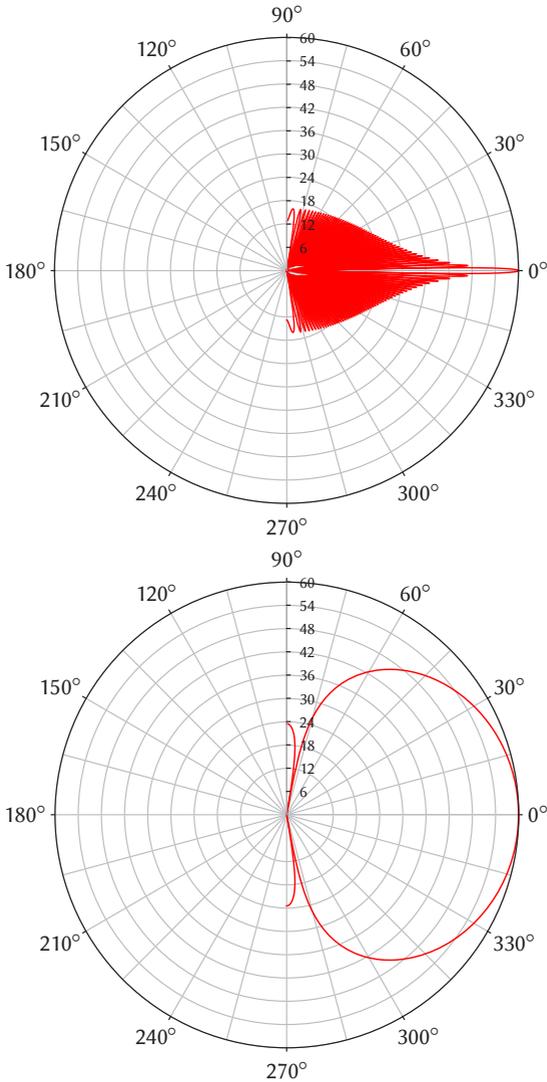


Abbildung 8.30: Antennendiagramme des Richtmaßes DI in logarithmischer Darstellung in dB in Azimutrichtung (oben) und Elevationsrichtung (unten) für den wasserseitigen Halbraum.

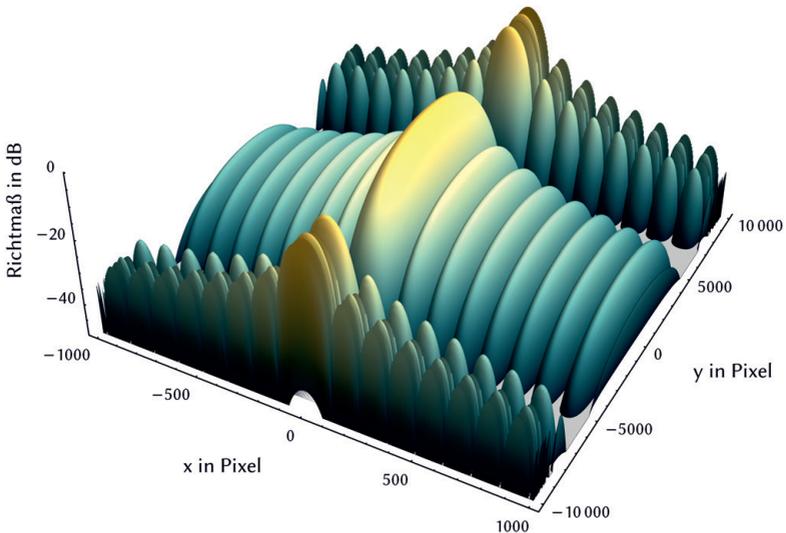


Abbildung 8.31: Richtmaß DI in dB in der Bildebene.

8.3.3.6 Rückstreumodell

Das Lambert'sche Gesetz (Abschnitt 4.2.6) wird für die Rückstreuung angewendet, was bedeutet, dass die Oberfläche als perfekt diffus streuend angenommen wird. Auf die komplexeren Rückstreumodelle aus Abschnitt 4.2.7 verzichtet, da die Lambert'sche Streuung für einen großen Winkelbereich eine sinnvolle Näherung ist (siehe Abschnitt 4.2.6). In der derzeitigen Ausbaustufe des Simulators wird die Lambert'sche Rückstreuung einheitlich für den Meeresboden und alle Objekte angenommen. Monostatische Rückstreuung (Abschnitt 4.2.5) zu modellieren reicht aus, da eine Stop-and-hop-Näherung vorgenommen wird, d. h. dass sich das Fahrzeug während der Aufnahme nicht bewegt und dann zum nächsten Aufnahmepunkt springt. Dadurch ist der Aussendeort auch der Aufnahmeort. Die Mehrwegeausbreitung wurde ebenfalls vernachlässigt. Bell [Bel95] spricht davon, dass bei einer Meeresbodenoberfläche ohne ein simuliertes Objekt (wie z. B. eine Pipeline) 95% der Strahlen die Szene nach der ersten Reflexion verlassen, der Rest schon nach der zweiten. Der Einfluss der Mehrwegeausbreitung ist also gering.

Im Folgenden wird zunächst erläutert, wie sich das akustische Signal aus den Einzelbeiträgen zusammensetzt.

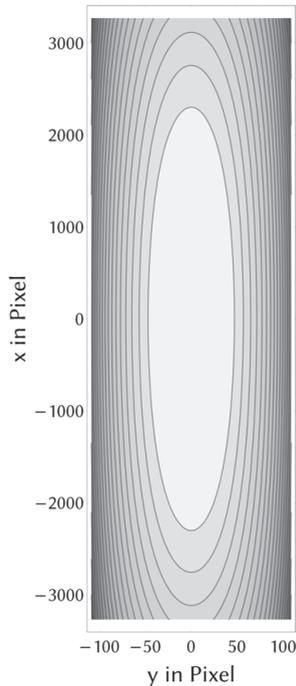


Abbildung 8.32: Konturplot des an den Renderer übergebenen Ausschnittes des Richtmaßes DI in der Bildebene. Man beachte die unterschiedliche Skalierung der Achsen.

8.3.3.7 Erzeugung des Sonarrohsignals

Das Signal breitet sich vom Sensor aus, wird von einem Objekt reflektiert und erreicht den Sensor nach einer Zeit, die unmittelbar von der zurückgelegten Strecke abhängt. Dies gilt natürlich nur unter der Annahme isotroper Schallausbreitung, die hier getroffen wird.

Zur Erzeugung des Sonarsignals werden zunächst die Einzelpulse gemäß der Intensitätsmaske aus der Richtcharakteristik und dem Oberflächenbeobachtungswinkel gewichtet (Abbildung 8.33 unten). Anschließend werden die Pulse entsprechend der Signallaufzeit t_r (engl. *two-way travel time*) zum Objekt zu einem Gesamtsignal addiert. Damit ergibt sich folgende Beschreibung für die Intensität I zum Zeitpunkt t :

$$I(t) := \sum_{(x,y)} E_{\text{ray}(x,y)}(t) = \sum_{(x,y)} R(x,y) \cdot x(t - t_r), \quad (8.37)$$

$$\text{mit } t_r := \frac{2r(x,y)}{c}, \quad (8.38)$$

$$\text{und } R(x,y) := \mathbf{n}(x,y)^T \cdot \mathbf{r}(x,y), \quad (8.39)$$

$$\text{sowie } r(x,y) = \|\mathbf{r}(x,y)\| \quad (8.40)$$

wobei $E_{\text{ray}(x,y)}(t)$ die Sonarintensität als Funktion über der Zeit entlang eines Strahls $\mathbf{r}(x,y)$ angibt, der vom Sensorzentrum durch das Pixel (x,y) der Bildebene verläuft. Des Weiteren beschreibt $R(x,y)$ die Intensitätsgewichtungsmaske in der Bildebene. $x(t - t_r)$ bezeichnet ein zeitverschobenes Sonarsignal und $r(x,y)$ ist der Abstand zum ersten vom Strahl $\mathbf{r}(x,y)$ getroffenen Oberflächenelement. Der Normalenvektor, der zu diesem Oberflächenelement gehört, ist mit $\mathbf{n}(x,y)$ bezeichnet. Die Schallgeschwindigkeit ist mit c bezeichnet und wird als überall konstant zu 1500 m/s für alle Messungen angenommen.



Abbildung 8.33: Um 90 Grad gedrehte und gestauchte Darstellung der Intensitätsverteilung in der Bildebene. Karte des Richtmaßes (oben, wie in Abbildung 8.32) und nach Einbezug der Oberflächennormalen (unten). Die Sandwellenstruktur ist deutlich zu erkennen.

8.3.3.8 Erzeugung der Hüllkurve

Die Verarbeitungsschritte für CW und FM unterscheiden sich voneinander. Um beim CW-Puls die Signal-Hüllkurve zu erhalten (denn nur diese interes-

siert tatsächlich) unterstützt die Simulationsumgebung für CW-Pulse sowohl inkohärente als auch die kohärente Demodulation. Da ohnehin im Zeitbereich simuliert wird, ist der Aufwand für die kohärente Demodulation nicht viel höher. Für die inkohärente Demodulation wird das Signal gleichgerichtet und tiefpassgefiltert, um die Trägerfrequenz zu entfernen [Wer10]. Da die Phaseninformation der Trägerfrequenz ebenfalls bekannt ist, kann die Einhüllende des empfangenen Signals durch Erzeugung der Hilberttransformierten mit anschließender Betragsbildung und Tiefpassfilterung gewonnen werden [Rab75]. Für die Tiefpassfilterung stehen ein im Simulator entwerfbares Raised-Cosine Finite-Impulse-Response-Tiefpassfilter (FIR-TP) [Fis99] zur Verfügung oder ein Constrained-Equiripple²⁷ FIR-TP mit vorberechneten Koeffizienten für die standardmäßige Vorauswahl der Frequenz (400 kHz).

Aus technischen Gründen werden im Anschluss noch durch Filterartefakte möglicherweise auftretende negative Energiewerte zu null gesetzt. Beim FM-Signal wird eine Pulskompression durchgeführt und danach die Trägerfrequenz per FIR-TP ausgefiltert.

In Sonarwandlern wird das Signal üblicherweise gleichgerichtet und das Bild als Druckbild dargestellt. Ob ein quadratischer oder linearer Empfänger (Abschnitt 6.2.3) verwendet wird, spielt für die Simulation keine große Rolle, da beides unterstützt wird. Wichtig ist nur, dass einheitlich simuliert wird. Z. B. muss die Einstellung bei Schätzverfahren wie in Abschnitt 9.4.3 auch bei der Berechnung des Sonaralphabets so gewählt werden, wie es bei den Daten des echten Sonargeräts geschieht.

Die Abtastrate der Rohdaten mit 2 MHz ist für viele Anwendungen unnötig hoch, so dass vor der Ausgabe noch eine Dezimierung auf eine gewünschte Zielabtastrate erfolgt. Das zunächst erhaltene Sonarsignal ist ein Signal in Slant-Range-Koordinaten (vgl. Abschnitt 6.3.3.1). Wird für die Anwendung ein Slant-Range-Bild gewünscht, wird es von den Rohdaten auf die gewünschte Ausgabeauflösung heruntergerechnet (engl. *downsampling*). Um das Signal in Ground-Range-Koordinaten zu bekommen, erfolgt keine Entzerrung des bereits berechneten Slant-Range-Signals, wie es bei real gewonnenen Daten passieren muss, sondern die Entstehung durch Raytracing erlaubt durch geeignete (nichtlineare) Wahl der Abtastintervalle (engl. *bin*, *binning*) eine

²⁷ Filterkoeffizienten erzeugt mit MATLAB:
<http://de.mathworks.com/help/dsp/ref/firceqrip.html> zuletzt abgerufen am 01.10.2015

direkte Erzeugung des Ground-Range-Signals. Unter anderem abhängig von der Bodengeometrie kann es insbesondere nahe beim Nadir vorkommen, dass sich die Quelldaten auf viele Bins verteilen müssen und einzelne Bins dann nur wenige Beiträge bekommen. Dies vermindert in diesen Bereichen die Bildqualität und erzeugt Artefakte.

Die Abtaststrategie wird für die synthetischen Experimente mit der Methode aus Abschnitt 9.4.4 zunächst extrem grob gewählt, ansonsten werden für die anderen Verfahren wie z. B. das Kernelverfahren in Abschnitt 9.4.3 2000 Sonarsamples verwendet. Die folgenden Bildausschnitte wurden jedoch aus höher aufgelösten Ausgabedaten erzeugt.

Ein Vergleich der Sonarmodi ist in den folgenden Abbildungen dargestellt, die aus dem Szenario in Abbildung 8.10 entstehen. Die Ausgabeauflösung wurde für die folgenden Detaildarstellungen zeitlich auf 30000 Samples erhöht, wovon jeweils ein Ausschnitt von gut 6000 Samples gezeigt ist, der das Echo und den Sonarschatten der Ankermine enthält. Das Histogramm der CW-Daten ist in Abbildung 8.39 gezeigt. Wie zu erwarten, zeigt die rauschfreie Modellierung (Abbildung 8.34) und die Modellierung des Chirps im Basisband (Abbildung 8.35) keine Speckle-Artefakte. Die Simulation mit dem Chirp (Abbildung 8.36) ergibt ein schärferes Bild als das des CW-Pulses (Abbildung 8.37), was sich durch die Pulskompression erklärt. Die kohärente CW-Simulation (Abbildung 8.38) hat den höchsten Rauschanteil. In Abbildung 8.39 ist das Histogramm für das Bild mit CW-Puls (Abbildung 8.37) ohne Kontraststreckung gezeigt. Es ähnelt einer Exponentialverteilung.

Energienormierung

Um die verschiedenen Sonar-Betriebsmodi miteinander vergleichen zu können wird die Sonarenergie nicht über den Energiegehalt jedes einzelnen Strahls modelliert. Die Nachbearbeitungsschritte machen die Vergleichbarkeit der Modi schwierig, da der Einfluss der Pulskompression bzw. der Einfluss der Tiefpassfilterung mitberücksichtigt werden müsste. Es wird daher ein Ansatz gewählt, der eine Normierung anhand der Abbildung des ebenen Meeresbodens durchführt: Jede Betriebsart (CW inkohärent, CW kohärent, FM, rauschfrei) bildet den ebenen Meeresboden ab und es wird aus der Summe aller Sonarsamples ein Normierungsfaktor errechnet, so dass alle Verfahren die gleiche durchschnittliche Helligkeit erzielen. Eine Kalibrierungssimulation, bei der das Sonar im Zentrum einer Kugel platziert ist und die Kugeloberfläche beschallt wird, ist verfügbar, wird derzeit aber

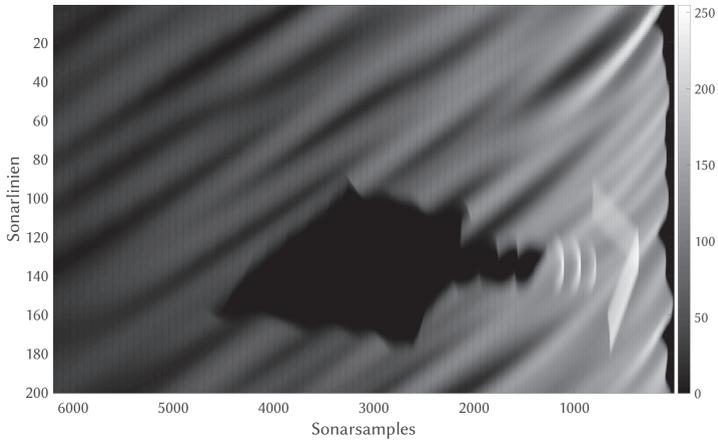


Abbildung 8.34: Simulation des Ankerminenobjekts mit dem rauschfreien Sonarmodus. Gezeigt sind 200 Sonarlinien.

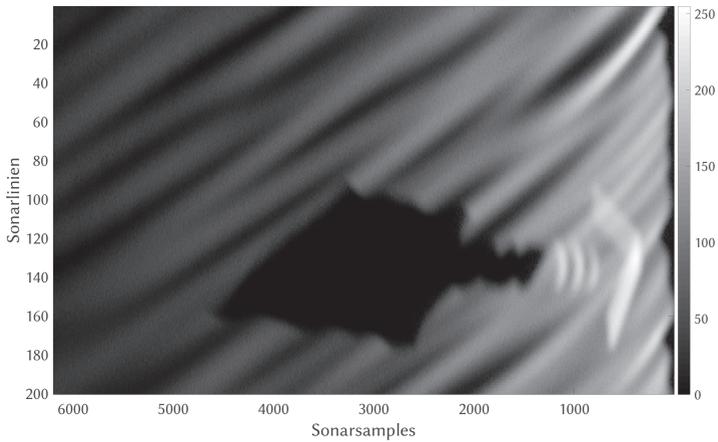


Abbildung 8.35: Simulation des Ankerminenobjekts mit dem linearen FM-Puls im Basisband. Gezeigt sind 200 Sonarlinien. Das Bild ist deutlich rauschärmer als die Bilder des CW-Pulses. Verglichen mit der rauschfreien Variante sind die Kanten weniger stark ausgeprägt.

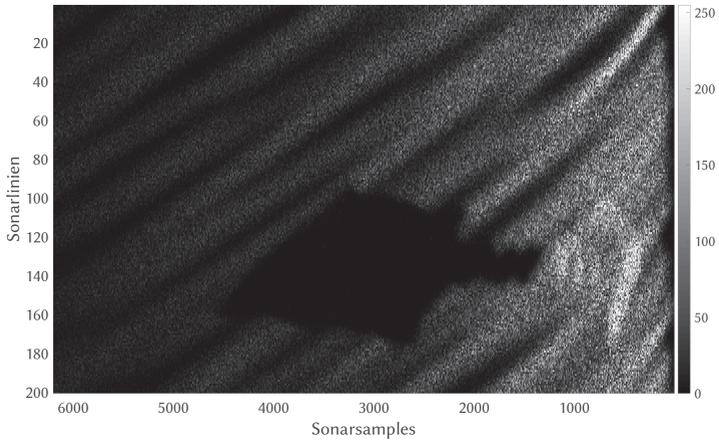


Abbildung 8.36: Simulation des Ankerminenobjekts mit dem linearen FM-Puls in der Trägerfrequenz. Gezeigt sind 200 Sonarlinien. Das Bild ist etwas schärfer als das des CW-Pulses. Zur besseren Darstellung wurde eine Kontrastspitzung um Faktor 4 durchgeführt.

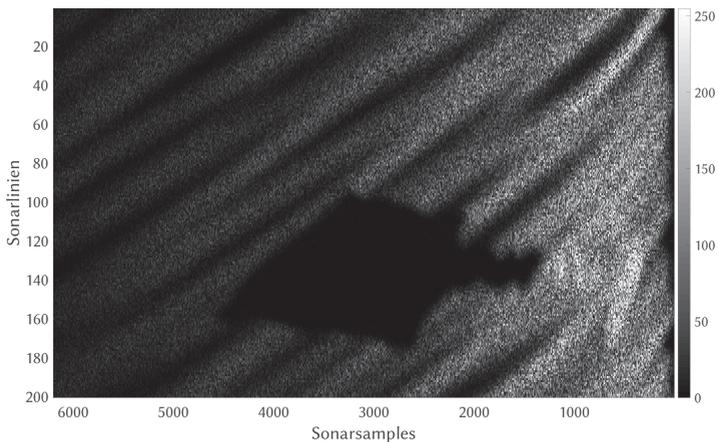


Abbildung 8.37: Simulation des Ankerminenobjekts mit dem CW-Sonarmodus. Zur besseren Sichtbarkeit im Bild wurde eine Kontrastspitzung mit Faktor 4 durchgeführt. Der Schattenwurf ist gut zu erkennen, das Objekt ist gerade noch zu erkennen.

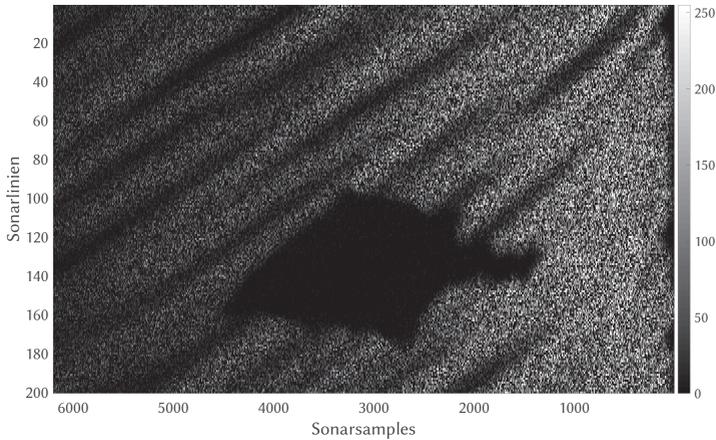


Abbildung 8.38: Simulation des Ankerminenobjekts mit dem kohärenten CW-Sonarmodus. Zur besseren Sichtbarkeit im Bild wurde eine Kontraststreckung mit Faktor 3 durchgeführt. Während der Schattenwurf immer noch gut zu sehen ist, ist ein Objekt allenfalls zu erahnen.

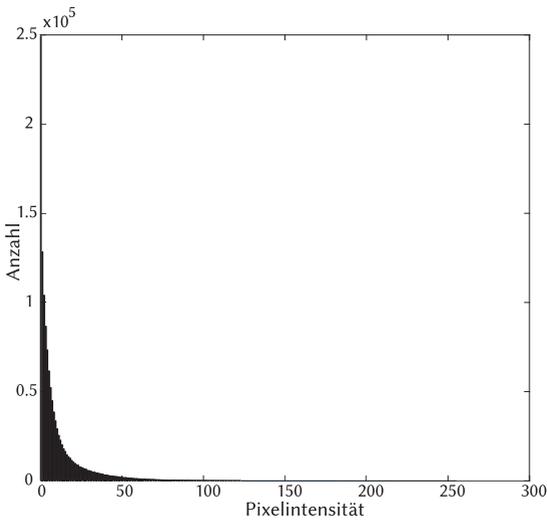


Abbildung 8.39: CW-Puls-Simulation: Die Intensitätshistogrammverteilung ähnelt einer Exponentialverteilung.

noch nicht automatisiert durchgeführt. In diesem Falle geht ausschließlich der Rückstreuugrad bei 90° des verwendeten Rückstreuomodells ein. Dies ist wichtig, da die rauschfreien Messungen später mit den anderen Messungen verglichen werden müssen.

8.3.3.9 Ausbreitungsdämpfung und TVG

Das TVG (siehe Abschnitt 6.3.3.6) hebt im allgemeinen die Wirkung der geometrischen Ausbreitungsdämpfung nicht exakt auf [Bel95], da sich durch nicht-isotrope Schallausbreitung (gegeben durch ein SVP) die Pfadlängen ändern und die Absorption ebenfalls dämpfend wirkt. Da jedoch in der Tiefsee durch die konstante Schallgeschwindigkeit isotrope Schallausbreitung eine gute Näherung ist und die Absorption in diesen Frequenzbereichen als rein entfernungsabhängige Größe betrachtet werden kann (Abschnitt 3.4.2.1), ist ein TVG, das die Ausbreitungsdämpfung und die Absorption perfekt ausgleicht, eine gute Näherung und wird hier wie auch in Langer et al. [Lan91] und Durá et al. [Dur04] verwendet.

8.3.4 Laufzeit

Die im Folgenden genannten Laufzeiten geben nur einen groben Anhaltspunkt, da der Programmcode nicht vorrangig auf Geschwindigkeit optimiert wurde. Manche Teilergebnisse werden in Dateien geschrieben, um das System modular zu halten. Dies wirkt sich freilich negativ auf die Geschwindigkeit aus. Die Laufzeiten gelten für einen Intel Core i5 (Haswell) mit 2 Kernen und 4 Threads bei 3,4 GHz:

Die geometrische Abtastung der Szene durch den Renderer Mitsuba [Jak10a] besteht aus hochoptimiertem CPU-Code, der sämtliche Prozessorkerne verwendet und auch Vektorbefehle des Prozessors wie SSE2. Mitsuba unterstützt derzeit noch kein GPU-Rendering. Je nach Komplexität der Szene dauert die Abtastung pro Messung etwa eine Sekunde bei der genannten Auflösung von 218×6538 . Die akustische Simulation dauert mit etwa 25 Sekunden (lineare FM Chirps) pro Messung deutlich länger.

8.3.5 Fazit und Vergleich

Grundsätzlich orientiert sich das Verfahren an der exzellenten Arbeit von Bell [Bel95]. Da sich die vorliegende Arbeit hauptsächlich mit der Rekonstruktion befasst, konnten nicht alle Merkmale solch einer Komplettsimulation umgesetzt werden, sondern es mussten Vereinfachungen für die Umsetzung angenommen werden. Die Simulationsumgebung ist dennoch sehr mächtig und reicht aus, um sinnvolle und genügend realitätsnahe Sidescan-Sonarbilder zu erzeugen.

Abschließend wird in Tabelle 8.1 nochmals ein tabellarischer Vergleich über die Leistungsfähigkeit der vorgestellten Simulationen gegeben.

Prinzip	Merkmal / Ansatz	Simulatoren											1D-Simulation Abschnitt 8.2		3D-Simulation WOSIM Abschnitt 8.3	
		Bell [Bel95]	Pailhas [Pai09]	Gueriot [Gué11]	Riordan [Rio05]	Groen [Gro06]	Coiras [Coi07]	Groen und Coiras [Coi09b; Coi09c]	Hunter [Hun06]	Bracker [Bra08]	Buskenes [Bus14]	k-Wave [Tre10]	Borawski [Bor05]			
Simulationstyp	Sidescan	●	●	●	●	?	●	○	?	●	?	⊙	●	●	●	●
	SAS	○	○	●	○	●	○	●	○	○	●	⊙	○	○	○	○
	Raytracing	●	○	●	●	○	○	○	●	●	●	○	●	○	●	●
	Pseudo-Raytracing	○	●	○	○	○	●	●	○	○	○	○	○	●	○	○
	Frequenzbereich	○	○	○	○	●	○	○	●	○	○	●	○	○	○	○
	PSTD	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●	○	○	○	○
Boden	Echte 3D-Szene möglich	●	○	●	?	●	○	○	●	●	●	?	●	○	●	
	Mehrere Bodenmodelle	●	●	●	●	○	?	?	?	●	⊙	○	○	○	●	
	Mehrere Sedimente	●	●	●	●	●	●	○	?	●	○	●	○	⊙	○	
Beschl.	Parallelimplementierung	○	?	?	?	?	?	●	●	●	●	●	?	○	●	
	GPU	○	?	?	?	?	?	●	○	●	●	●	?	○	○	
	CPU	○	?	?	?	?	?	○	●	○	?	●	?	○	⊙	
Modelldetails	3D-Antennencharakteristik	●	○	●	○	?	?	?	●	●	○	⊙	○	○	●	
	CW-Puls	●	?	●	○	?	?	?	?	?	○	⊙	○	○	●	
	FM-Puls	○	○	?	○	●	?	?	●	?	○	⊙	○	○	●	
	Inkohärent	●	●	●	●	?	●	●	?	●	●	⊙	○	●	●	
	Kohärent	○	○	●	○	●	○	○	●	⊙	○	⊙	○	○	●	

Tabelle 8.1: Übersicht über Sonarsimulatoren. Dabei bezeichnet ● ein vorhandenes Merkmal, ○ ein nicht vorhandenes Merkmal, ⊙ ein teilweise vorhandenes Merkmal bzw. wenn die Verwendung möglich ist und ?, wenn unklar ist, ob das Merkmal vorhanden ist oder nicht.

Sonardatenauswertung

In diesem Kapitel soll die Rekonstruktion der Umgebungsbathymetrie aus Sidescan-Sonardaten eines AUV dargelegt werden. Dazu wird zuerst der Einfluss der Eigenbewegung auf die Sonardaten beschrieben und im Anschluss werden die erarbeiteten Rekonstruktionsverfahren vorgestellt.

9.1 Einfluss von Eigenbewegung auf Sonardaten

Die Antennenkeulen der regelmäßig erfolgenden Sonar-Pings des Sidescan-Sonars tasten den Boden idealerweise ebenso regelmäßig ab. Dies ist der Fall, wenn das Fahrzeug mit konstanter Geschwindigkeit bei gleichbleibender Höhe über Grund exakt geradeaus fährt, der Boden komplett eben ist und die Schallausbreitung isotrop. Diese Annahmen sind in der Realität normalerweise nicht gegeben. Isotrope Schallausbreitung kann in der Tiefsee als gute Näherung angenommen werden, eine exakte Geradeausfahrt findet jedoch i.A. nicht statt [Woo11a; Woo12a]. Bereits kleine Störungen haben große Auswirkungen auf die Datenaufnahme.

9.1.1 Einfluss des Nickwinkels

Nicken des Fahrzeugs sorgt dafür, dass der Sonarstrahl durch (engl. *back-scanning*) entweder hinter oder vor dem Fahrzeug liegende Bereiche trifft. D.h. das Fahrzeug »schaut vor« oder »schaut zurück«. Dadurch entspricht die zeitliche Abfolge der Daten nicht mehr notwendigerweise der räumlichen Abfolge. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 9.1 dargestellt.

9.1.2 Einfluss des Gierwinkels

Gieren des Fahrzeugs hat den stärksten Einfluss auf die Sidescan-Sonardatenaufnahme. Aufgrund der großen Reichweite des Sidescan-Sonars führen

bereits kleine Änderungen am Gierwinkel dazu, dass völlig andere Bereiche aufgenommen werden, bzw. die Sampledichte am Boden stark schwankt. Dies ist in Abbildung 9.2 dargestellt.

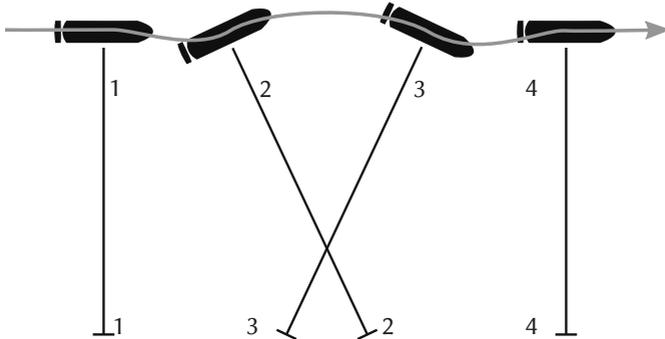


Abbildung 9.1: Nickbewegung des Unterwasserfahrzeugs.

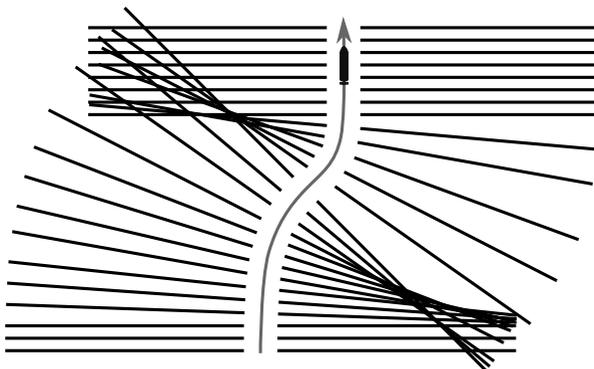


Abbildung 9.2: Abdeckung des Missionsgebietes bei Kurvenfahrt.

9.1.3 Einfluss des Rollwinkels

Wenn das Fahrzeug eine Rollbewegung vollführt, ändert sich der beschallte Bereich am Boden vergleichsweise wenig. Es kommt hauptsächlich zu Intensitätsverschiebungen, da sich die Hauptkeule des Sonars innerhalb des Bereichs verschiebt. Bei starken Rollbewegungen kann es jedoch zu Layover kommen. Beleuchtet eine Seite des Sidescan-Sonars den Untergrund

auf beiden Seiten des Nadir, kommen die Signale (unter Annahme eines ziemlich ebenen Meeresbodens) nahezu zeitgleich zurück und überlagern sich additiv. Man kann aus dem Rollwinkel der Eigenbewegungsdaten vorhersagen, welche Teile des empfangenen Sonarsignals wahrscheinlich durch Layover betroffen sind. Dies ist in den Abbildungen 9.3 und 9.4 dargestellt.

Ist die Montage des Sonars derart, dass der Winkel $\beta_m > 0$ ist und damit Winkel $\varphi_r \neq 90^\circ$, gilt für die Ground-Range-Berechnung folgendes:

$$r_s^2 = h_r^2 + r_g^2 - 2h_r r_g \cos \varphi_r, \quad (9.1)$$

$$\text{woraus folgt } r_g = h_r \cos \varphi_r + \sqrt{r_s^2 - h_r^2 \sin^2 \varphi_r}, \quad (9.2)$$

$$\text{wobei } h_r := \frac{h_{\text{AUV}}}{\cos(\rho_r - \beta_m)} \text{ gilt.} \quad (9.3)$$

Ist der Rollwinkel ρ_r kleiner als der Montagewinkel β_m , gibt es keine Regionen, in denen Layover vorkommt und folgende Winkel kommen für die Berechnung der beiden Seiten zum Einsatz:

$$\varphi_r = 90^\circ + \rho_r + \beta_m, \quad (9.4)$$

$$\varphi'_r = 90^\circ - \rho_r + \beta_m. \quad (9.5)$$

Durch den Layover bei starken Rollbewegungen müssen folgende Winkel für die Ground-Range-Entzerrung verwendet werden:

$$\varphi_r = 90^\circ + \rho_r + \beta_m, \quad (9.6)$$

$$\varphi'_r = 90^\circ + \rho_r - \beta_m. \quad (9.7)$$

Der Einfluss durch Roll ist vergleichsweise subtil und macht sich kaum an der geometrischen Verteilung der Samples bemerkbar.

Aus Abbildung 9.4 wird auch klar, dass ein Sidescan-Sonar allein aus den Sonardaten nicht unterscheiden kann, ob der Untergrund schräg abfällt oder das Fahrzeug tatsächlich rollt.

9.1.4 Einfluss der Flughöhe über Grund

Durch größere Flughöhen über Grund trifft der Sonarstrahl aufgrund des leicht schrägen Einbaus erst etwas weiter entfernt vom Nadir auf und vergrößert dadurch die Nadirlücke. Durch die größere Flughöhe können

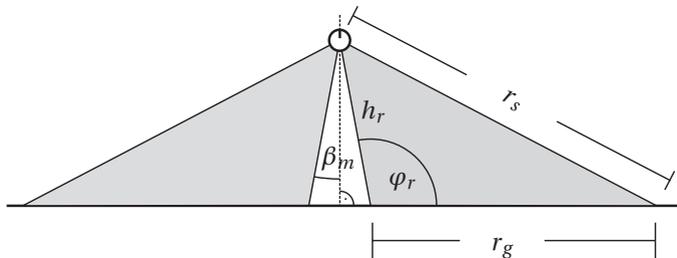


Abbildung 9.3: Winkel am Fahrzeug vor Rollbewegung

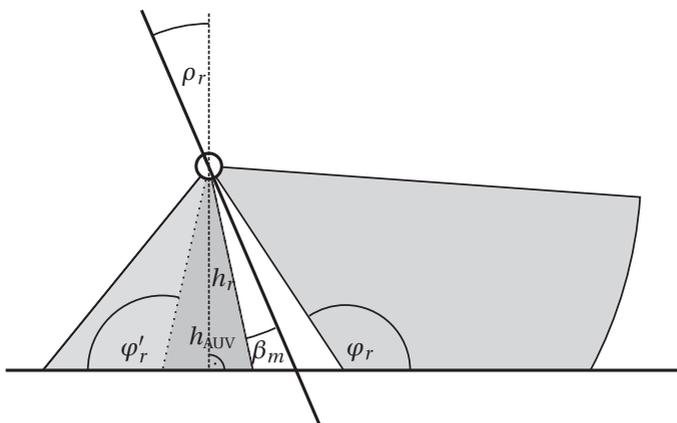


Abbildung 9.4: Rollen des Fahrzeugs

geometrisch zwar weiter entfernte Gebiete beleuchtet werden, man bekommt jedoch kein rechtzeitiges Echo mehr, wenn die Gebiete dann außerhalb der Reichweite des Sonars liegen. Bei geringen Flughöhen hingegen wird die maximal mögliche Reichweite (engl. *range*) möglicherweise nicht voll ausgenutzt, da alle Echos schon eingetroffen sind, bevor die Aufnahmezeitdauer abgelaufen ist. Abbildung 9.5 verdeutlicht dies.

Zu Rekonstruktion sind Zusatzinformationen wie die Höhe über Grund in jenen Fällen hilfreich, in denen der FBR nicht aus dem Nadir kommt und daher die Schätzung der Flughöhe aus den Sonardaten selbst einen falschen Wert liefert.

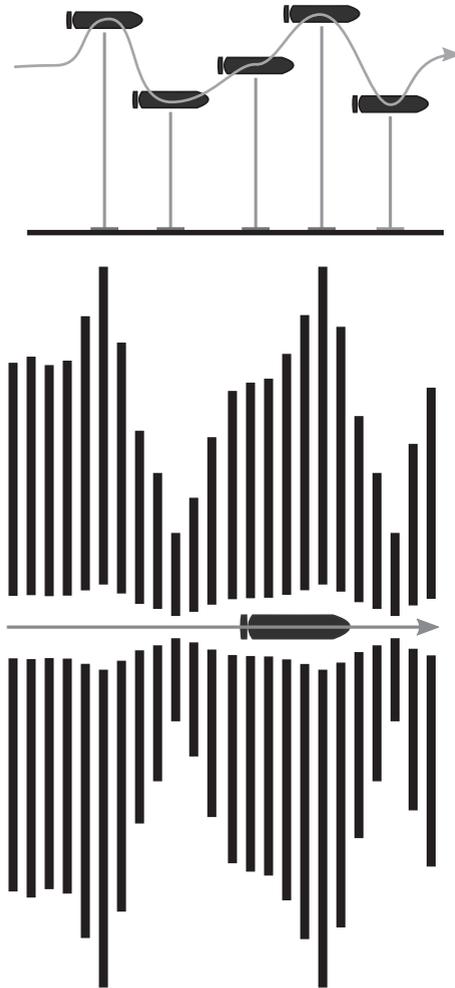


Abbildung 9.5: Einfluss der Flughöhe über Grund auf die Sidescan-Sonardaten.

Die genannten Einflüsse können einheitlich behandelt werden, indem die Datenauswertung die 3D-Pose des Aufnahmezeitpunkts berücksichtigt. Dies wird bei Sidescan-Sonardaten klassischerweise nicht gemacht. Verfahren, die dies berücksichtigen, werden in den Abschnitten Abschnitt 9.4.2 und Abschnitt 9.4.4 vorgestellt.

9.2 Das Rekonstruktionsproblem

Die betrachtete Aufgabenstellung ist wie folgt: Ein Sidescan-Sonar ist an einem AUV angebracht, das einen zu kartierenden Bereich überfährt und eine Menge Sonarmessungen \mathcal{B} erzeugt. Jede Einzelmessung m des Sonars besteht aus dem Echo des Schallpulses über der Zeit. Diese Sonarzeilen werden klassischerweise zu einem Bild gestapelt, das dann die Messungen eines gewissen Zeitraums enthält.

Bisher wurden diese Daten auf Seiten der Auswertung mehrheitlich als Bilddaten behandelt und mit Methoden der Bildverarbeitung weiterverarbeitet. Diese Vorgehensweise birgt jedoch Probleme, denn bei Fahrten, die nicht exakt geradeaus verlaufen, erscheinen im Bild sofort Verzerrungen. Darüber hinaus werfen über die Oberfläche ragende Objekte sogenannte Sonarschatten, die das Gesamtbild unterschiedlich aussehen lassen, je nachdem von welcher Seite das Objekt mit dem Sonar beschallt wird. Das bedeutet, dass dasselbe Objekt in unterschiedlichen Sonaraufnahmen nicht gleich aussieht, was bildbasierte Verfahren nicht lösen können.

Das Schätzproblem, aus Sidescan-Sonardaten eine dreidimensionale Oberflächenrekonstruktion zu erzeugen ist stark unterbestimmt. Daher müssen gewisse Regularisierungsannahmen getroffen werden, was zur Folge hat, dass die Rekonstruktion nur dann korrekt ist, wenn diese Annahmen auch tatsächlich zutreffen. Bereits Langer et al. [Lan91] schreiben, dass aus Sidescan-Daten nur eine qualitative Höhenkarte geschätzt werden kann, die aber genügend Informationen enthalten sollte, um die Navigation eines autonomen Fahrzeugs schätzen zu können. Blondel [Blo09] weist auf die generelle Schwierigkeit hin, dass Sidescan-Sonare oft unkalibriert sind und die Rückstreuwerte daher nur als relative Rückstreuwerte zu betrachten sind. Weiter führt Blondel aus, dass dies die Vergleichbarkeit mit anderen Karten des gleichen Gebiets schwierig macht, selbst wenn der gleiche Sensor – jedoch mit anderen Einstellungen – verwendet wurde. Dass Sidescan-Sonare häufig unkalibriert sind, ist jedoch nicht verwunderlich, da sie vornehmlich verwendet werden, um qualitative Aussagen über den Meeresboden zu machen. In der vorliegenden Arbeit soll versucht werden auch quantitative Informationen zu extrahieren. Darüber hinaus weist Blondel darauf hin, dass die Ableitung von Bathymetrieinformation aus Bildern durch SfS-Verfahren zwar »verführerisch« sei, die Ergebnisse bisher aber noch einiges zu Wünschen übrig lassen.

Durch die in dieser Arbeit entwickelten Rekonstruktionsverfahren wird aus den Sonardaten unter Berücksichtigung der Fahrzeugeigenbewegung die Oberflächenform des Meeresbodens geschätzt, indem der physikalische Entstehungsprozess der Bildaufnahme zugrunde gelegt wird. Damit sind Effekte wie der unterschiedliche Schattenwurf eine natürliche Folge der Meeresbodengeometrie. Die so geschätzte Oberflächenform ist also für Überfahrten über ein Objekt von unterschiedlichen Seiten sehr ähnlich, im Idealfall identisch. Durch die Rekonstruktionsverfahren wird aus dem rein bildgebenden Sidescan-Sonar quasi ein profilbildendes Sonar. Anhand der geschätzten Oberflächengeometrie wird es nun weiter möglich, mit SLAM-Verfahren nicht nur eine Umgebungskarte zu schätzen, sondern sich auch in dieser Karte zu lokalisieren. In dieser Arbeit wird die SLAM-Formulierung nicht behandelt, die Grundlagen dafür werden aber gelegt, indem die Umgebungsform aus Sonardaten rekonstruiert wird, so dass eine Wiedererkennung auf Basis der Form und nicht auf Basis der hochgradig veränderlichen Sonardaten selbst stattfinden kann.

Die Verfahren benötigen Sonardaten entweder nur zur Eingabe oder als Vorwärtsmodell während des Schätzprozesses. Diese Daten werden mit den Simulatoren aus Kapitel 8 erzeugt, indem ein Terrain erzeugt wird und dann entlang einer Fahrzeugtrajektorie die Aufnahme von Sonarmessungen über diesem Terrain simuliert wird. Diese künstlichen Messungen werden an das Rekonstruktionsverfahren zusammen mit der als perfekt bekannt angenommenen Fahrzeugeigenbewegung übergeben. Das Rekonstruktionsverfahren erstellt dann die Oberflächengeometrie für die Messungen, die als Eingabe für die Zuordnung der Orte fungiert.

Das Kapitel gliedert sich wie folgt: Zunächst wird das inverse Problem der Rekonstruktion dargelegt. Im Anschluss werden die eigenen Arbeiten zur Rekonstruktion vorgestellt. Diese umfassen zunächst eine Betrachtung der Einflüsse der Eigenbewegung auf die Sidescan-Sonardatenaufnahme. Diesbezüglich wird beim modifizierten Rekonstruktionsverfahren von Coiras (Abschnitt 9.4.2) insbesondere der Einfluss des Gierens des Fahrzeugs untersucht, da dies falsche Nachbarschaftsbeziehungen im Pixelraster erzeugt und mithin für eine falsche Berechnung der Normalen sorgt. Dies wird durch eine Änderung der verwendeten Datenstruktur zu einer 3D-Punktwolke erzielt. Ebenso wird ein Salienz-Merkmal für Punkte auf Punktwolken vorgestellt, die eine Elevationskarte abbilden und außer einer Nächste-Nachbar-

Bestimmung keine Struktur aufweist. Im Anschluss wird die kernelbasierte Rekonstruktion vorgestellt, die durch Vergleich mit vorberechneten Sonarantworten eine Rekonstruktion pro Sonarzeile durchführt und diese unter Berücksichtigung der Aufnahmepose und der Strahlgeometrie in einer globalen Karte zusammenführt. Zuletzt wird noch ein Verfahren vorgestellt, das aus dem optischen Raytracing stammt und mittels Belief Propagation auf einer MRF-Struktur die Meeresbodenform als MAP-Schätzung gewinnt. Der Nachrichtenaustausch in der MRF-Struktur wurde an die Sidescan-Aufnahme angepasst, indem die eindimensionalen optischen Sichtstrahl-Faktoren durch zweidimensionale Sonar-Beam-Faktoren ersetzt wurden.

9.3 Rekonstruktion – ein Inverses Problem

Die Rekonstruktion des Meeresbodens aus den Messungen eines Sidescan-Sonars ist ein inverses Problem. Das bedeutet, dass von einer beobachteten Wirkung auf deren Ursache geschlossen werden soll. Das Problem ist darüber hinaus schlecht gestellt. Schlecht gestellt bedeutet, dass das Problem nicht gut gestellt im Hadamard'schen Sinne ist [Rie03]. Rieder gibt folgende Definition für ein gut gestelltes Problem: Sei $A : X \rightarrow Y$ eine Abbildung zwischen den topologischen Räumen X und Y . Das Problem (A, X, Y) heißt gut gestellt, wenn folgende Eigenschaften erfüllt sind:

- Existenz: Die Gleichung $Ax = y$ hat für jedes $y \in Y$ eine Lösung.
- Eindeutigkeit: Diese Lösung ist eindeutig bestimmt.
- Stabilität: Die inverse Abbildung $A^{-1} : Y \rightarrow X$ ist stetig, d. h. die Lösung x hängt stetig von den Eingangsdaten ab. Das bedeutet, dass kleine Störungen in y kleine Störungen in x bewirken.

Ist eine der Bedingungen verletzt, heißt das Problem *schlecht gestellt*.

Um Sidescan-Sonardaten daher korrekt auswerten zu können, müssten alle Entstehungsparameter der Daten bekannt sein, was schon alleine aufgrund des Rauschens unmöglich ist. Es ist schnell einsichtig, dass die Eindeutigkeit bei der Sonardatenaufnahme nicht gegeben ist: Mehrere Oberflächen können eine identische Sonarantwort erzeugen, beispielsweise indem in Schattenbereichen ein anderes Höhenprofil zugrundegelegt wird. Dieser Sachverhalt ist in Abschnitt 9.4.1 näher ausgeführt. Zudem können kleine Änderungen

der Sonardaten deutlich andere Rekonstruktionen hervorrufen, etwa würde eine helle Stelle eine Erhebung mit Schattenwurf nach sich ziehen. Dies wird im Laufe des Kapitels deutlich.

9.3.1 Inversion als Optimierungsproblem

Das Vorwärtsproblem besteht daraus, zu beschreiben, wie eine Sonarmessung \mathbf{m} aus der Abbildung durch ein Sidescan-Sonar $\mathcal{S}_{\text{TRUE}}$ entsteht. Das kann als Funktion gesehen werden, die von mehreren Eingabedaten abhängt:

$$\mathbf{m}(t) = \mathcal{S}_{\text{TRUE}}(Z(x, y), \mathbf{x}_{\text{src}}, \mathbf{x}_{\text{sensor}}, DI(\varphi_a, \varphi_e), f, x(t), \quad (9.8)$$

$$c(\mathbf{r}), \alpha(\mathbf{r}), \sigma_s(\theta_i, \theta_s, x, y, f), \Xi(t)). \quad (9.9)$$

Auf die Sonardatenaufnahme $\mathcal{S}_{\text{TRUE}}$ haben Einfluss: Der abzubildende Meeresboden (hier als Höhenkarte) $Z(x, y)$ mit seinen Reflektanzeigenschaften $\sigma_s(\theta_i, \theta_s, x, y, f)$, die Eigenbewegung in Form der 6D-Pose des Senders \mathbf{x}_{src} und des Empfängers $\mathbf{x}_{\text{sensor}}$. Weiter nehmen Einfluss die Antennencharakteristik $DI(\varphi_a, \varphi_e)$, die verwendete Frequenz f sowie das Medium in Form des vollständigen Schallgeschwindigkeits- und Absorptionsfeldes an jedem Punkt $c(\mathbf{r})$ bzw. $\alpha(\mathbf{r}, f)$. Auch die Ausgestaltung des Sendepulses $x(t)$ geht mit in die Daten ein. Unter $\Xi(t^s)$ seien Signalverarbeitungsschritte wie z. B. das TVG subsumiert.

Die tatsächliche Messung ist als $\mathbf{m}_{\text{sensor}}(t)$ gegeben. Das inverse Problem besteht nun daraus, eine Funktion $\mathcal{S}_{\text{TRUE}}^{-1}$ zu finden, die folgendes leistet:

$$Z(x, y) = \mathcal{S}_{\text{TRUE}}^{-1} \left(\mathbf{m}_{\text{sensor}}(t), \underbrace{\mathbf{x}_{\text{src}}}_{=\mathbf{x}_{\text{sensor}}}, \mathbf{x}_{\text{sensor}}, DI(\varphi_a, \varphi_e), f, x(t), \quad (9.10)$$

$$\left. \underbrace{c(\mathbf{r})}_{\text{konst.}}, \underbrace{\alpha(\mathbf{r})}_{\text{konst.}}, \underbrace{\sigma_s(\theta_i, \theta_s, x, y, f)}_{\text{überall voll diffus}}, \Xi(t) \right). \quad (9.11)$$

Um schlecht gestellte inverse Probleme lösen zu können, müssen Regularisierungsannahmen getroffen werden. Dies sind Modellannahmen, die eine Invertierung des Problems ermöglichen, jedoch eine falsche Lösung liefern, wenn sie nicht zutreffen. Die in dieser Arbeit gemachten Annahmen sind folgende, wie sie auch in Gleichung (9.11) dargestellt sind: Das Wasser besitzt

überall die gleiche Schallgeschwindigkeit. Der Einfluss der Absorption ist in der Simulation und in der Rekonstruktion gleich, also kann er weggelassen werden, ebenso wie der Einfluss des TVG. Die Antennencharakteristik wird als bekannt vorausgesetzt, genauso wie der Sendepuls $x(t)$. Die Sendeposition wird auch als Empfängerposition angenommen (Stop-and-hop-Näherung). Damit reduziert sich die bistatische Streuung zur Rückstreuung $\sigma_{bs}(\theta_i)$ und zusätzlich wird überall das frequenzunabhängige Lambert'sche Modell angenommen. An die Oberflächenform $Z(x,y)$ werden meistens Glattheitsanforderungen gestellt.

Insbesondere das einheitliche Rückstreumodell ist eine sehr starke Regularisierungsannahme. Um aus den Rückstreuwerten realer Daten korrekt auf die Bathymetrie rückschließen zu können, wäre es hilfreich, die Sedimenttypen und damit den korrekten Rückstreugrad $\sigma_{bs}(\theta_i, x, y, f)$ im Bild zu kennen. Dafür wäre jedoch eine vorgeschaltete Texturanalyse mit Segmentierung und Klassifikation notwendig, was eine eigene Aufgabe darstellt, die hier nicht betrachtet wird. In den simulierten Daten wurde demnach nur ein Sedimenttyp simuliert und aus diesem Grund wird diese Annahme auch bei der Rekonstruktion gemacht.

9.4 Eigene Arbeiten zur Rekonstruktion

9.4.1 Kreisbogenmodell

In diesem Abschnitt soll zunächst eine Formulierung gegeben werden, wie eine analytische Rekonstruktion unter der Annahme von homogener Schallausbreitung, homogenem Sediment und stetig zusammenhängender Meeresbodenoberfläche aussehen kann.

Zunächst wollen wir die einfachste Betrachtung in der Ebene senkrecht zur Fahrtrichtung vornehmen: Ein Sonarsensor mit isotroper Antennencharakteristik sendet einen Puls aus, der durch ein homogenes Medium nicht gestört wird. Dieser Puls wird von einer stetigen und isotrop streuenden Oberfläche zurückgeworfen. Ferner sei angenommen, die zeitabhängige Verstärkung (TVG) gleiche die geometrische Ausbreitungsdämpfung perfekt aus und man erhalte die Messung m .

Die differentielle Messung m^{-F} ergibt sich nach Abzug der Sonarantwort eines flachen Meeresbodens:

$$m^{-F} = m - m_F. \quad (9.12)$$

Diese differentielle Messung bestehe aus Samples in drei Intensitätsstufen: Einzelstehende Schlaglicht-Messwerte sind direkt gefolgt von Schattenmesswerten. Dazwischen liegen Messungen ohne Unterschied zum ebenen Meeresboden. In diesem Modell kann nur über eine größere Rückstreufäche ein stärkeres als ein durchschnittliches Echo erzeugt werden. Das wiederum bedeutet, dass die Oberfläche ein Kreisbogenteilstück mit dem Sonar als Mittelpunkt enthalten muss.

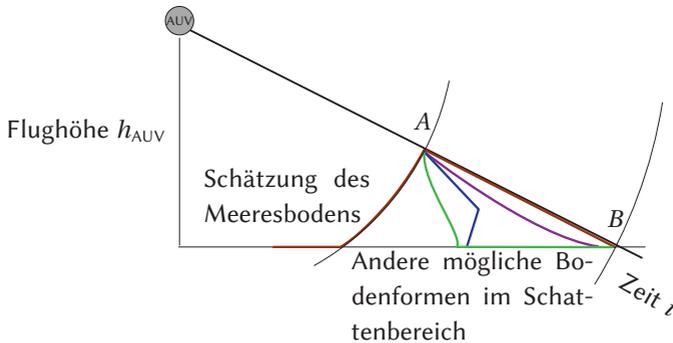


Abbildung 9.6: Rekonstruktion von Schattenbereichen

Da die ausgestrahlte Energie unabhängig von der Bodenform gleich bleibt und die Oberfläche stetig sein soll, muss die Energie eines Schlaglicht-Samples durch entsprechend lange Schattenbereiche ausgeglichen werden. In Abbildung 9.6 ist dargelegt, dass es prinzipiell nicht möglich ist, die Inhalte eines Schattenbereichs aus einer Aufnahme zu schätzen, da verschiedene Oberflächenformen im Schattenbereich ohne Einfluss auf das Sonarecho bleiben. Ein Schattenbereich kommt zustande, wenn die Tangente an die Oberfläche in Strahlausbreitungsrichtung verläuft oder noch stärker abfällt, d. h. die Steigung der Oberfläche stärker abfällt als $-h_{AUV}/r_g$. Diese maximal hohe Rekonstruktion in Strahlausbreitungsrichtung für Schattenbereiche wird in diesem Beispiel als Rekonstruktionsmodell verwendet. In diesem Fall lässt sich die Rekonstruktion z analytisch beschreiben.

Seien $\mathcal{H} = \{s_{HiLight}\}$ eine Menge von J Schlaglichtpunkten und \mathcal{D} eine gleich mächtige Menge mit Schattenintervallen $\mathcal{D} = \{(s_{SBeg}, s_{SEnd})\}$ aus denen sich J Schlaglicht-Schattenpaare bilden lassen. Der Abstand zum ebenen Meeresboden sei h_{AUV} . Da gefordert ist, dass $s_{HiLight} = s_{SBeg}$ ergibt sich für jedes j :

$$z_j(s) = \begin{cases} h_{AUV} & \text{für} & s < \sqrt{-h_{AUV}^2 + s_{SBeg}} \\ -\sqrt{s_{SBeg}^2 - s^2} & \text{für} & \sqrt{s_{SBeg}^2 - h_{AUV}^2} \leq s < \frac{s_{SBeg}\sqrt{s_{SEnd}^2 - h_{AUV}^2}}{s_{SEnd}} \\ \frac{s \cdot h_{AUV}}{\sqrt{s_{SEnd}^2 - h_{AUV}^2}} & \text{für} & \frac{s_{SBeg}\sqrt{-h_{AUV}^2 + s_{SEnd}^2}}{s_{SEnd}} \leq s < \sqrt{s_{SEnd}^2 - h_{AUV}^2} \\ h_{AUV} & \text{für} & s > \sqrt{s_{SEnd}^2 - h_{AUV}^2} \end{cases} \quad (9.13)$$

Für die Summe der Rekonstruktionen ergibt sich dann:

$$Z(s) = \sum_{j=1}^J z_j(s) - (J-1) \cdot h_{AUV}. \quad (9.14)$$

In Abbildung 9.7 ist die Rekonstruktion für zwei Schattenbereiche dargestellt.

Nimmt man an, dass nach einem Schlaglicht-Sample nicht ein Schattenbereich folgt, also $s_{HiLight} \neq s_{SBeg}$, sondern ein Bereich mit neutraler Rückstreuung und dann ein weiteres Schlaglicht, lässt sich dies auch noch analytisch darstellen, indem ein Plateau parallel zur Initialhöhe geschätzt wird. Dies setzt jedoch voraus, dass man zu jedem Schlaglicht den passenden Schattenbereich kennt, also eine vollständige Schachtelung von Schlaglicht-/Schattenpaaren. Pathologische Fälle wie das Zusammenfallen von Schattenbereichen lassen sich damit nicht abbilden. Es müsste eine Aufteilung des Schattenbereichs zu den Schlaglichtern passieren, was ohne Vorwissen nicht möglich ist.

Immer wenn es eine Meeresbodenkonfiguration gibt, bei der eine Wellenfront in einem Zeitschritt verschiedene Punkte trifft, gibt es eine andere Meeresbodenkonfiguration, die das gleiche Sidescan-Sonarbild erzeugt und bei der nur ein Punkt getroffen wird [Coi07].

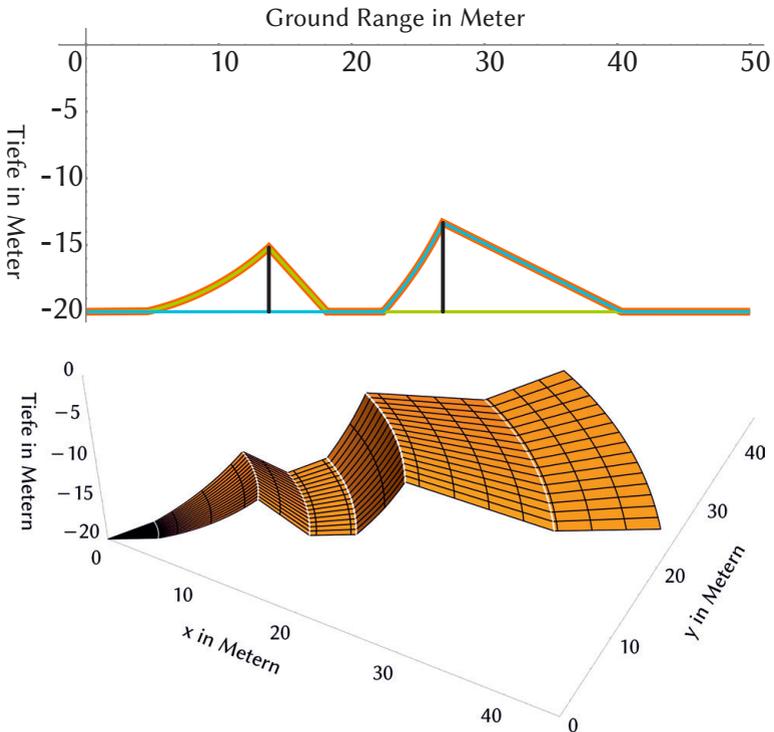


Abbildung 9.7: Maximale Rekonstruktion durch Kreisbögen. In den Daten seien Schlaglichter in bei Slant Range 20,5m und 30m sowie Schattenbereiche in den Slant-Range-Bereichen von 20,5m bis 27,0m sowie von 30m bis 45m erkannt worden. Wenn weiter ein ebener Meeresboden angenommen wird, kann die Maximalrekonstruktion analytisch als Funktion gegeben werden (oben). Die azimutale Richtung des Echos ist dann allerdings immer noch unbekannt. Eine Rekonstruktion für den gesamten Öffnungswinkel erzeugt entsprechend Kugelsegmente im Anstieg und Kegelmantelteile im Abstieg (unten).

Diese zweite Konfiguration wird von allen Verfahren geschätzt, die voraussetzen, dass die Elevationsfunktion $Z(r)$ eine stetige Funktion der Reichweite r ist.

Mit weiterem Wissen wie z.B. Vorwissen über die Form von zu rekonstruierenden Objekten (Pipeline) kann im Schattenbereich freilich auch eine andere Form geschätzt werden. Die Schätzung in der Form der Ausbrei-

tungsrichtung des Sonars ist jedoch eine sinnvolle Annahme, da sich die Methoden nicht auf Objekte eines bestimmten Typs beschränken, sondern den allgemeinsten Fall abbilden.

Diese analytische Rekonstruktion benötigt extrem viele Regularisierungsannahmen, um eine Schätzung erzielen zu können. Das macht sie für praktische Zwecke eher weniger interessant, auch wenn Cuschieri et al. [Cus90] mit einem vergleichbaren Ansatz Elevationskarten zur Pfadplanung erzeugt haben (siehe Abschnitt 7.8.2).

9.4.2 Erweiterung eines pixelbasierten Rekonstruktionsverfahrens

In diesem Abschnitt wird eine Erweiterung eines Verfahrens aus der Literatur von Coiras et al. [Coi07] vorgestellt. Die Autoren beschreiben ein Rekonstruktionsverfahren, mit dem bei Geradeausfahrt aus Sidescan-Daten iterativ ein Relief des Meeresbodens geschätzt werden kann.

9.4.2.1 Originalverfahren nach Coiras

Zunächst soll das Originalverfahren dargestellt werden, bevor auf die Modifikation eingegangen wird: Als Eingabe dient dem Verfahren ein aus 1000 Sidescan-Sonarlinien gestapeltes Bild. Das Verfahren nimmt ein Lambert'sches Rückstreumodell an sowie keine geometrische Ausbreitungsdämpfung, da sie durch das TVG bereits korrigiert ist.

Die Intensität I eines Bodenpunktes $\mathbf{p}_c = (x, y, Z(x, y))$ in den Sonardaten setzt sich folgendermaßen zusammen:

$$I(\mathbf{p}_c) = K \cdot DI(\mathbf{p}_c) \cdot TS(\mathbf{p}_c) \cdot |\cos(\phi(\mathbf{p}_c))|, \quad (9.15)$$

$$\text{mit } \cos(\phi(\mathbf{p}_c)) = \frac{\mathbf{r}(\mathbf{p}_c) \cdot \mathbf{n}(\mathbf{p}_c)}{|\mathbf{r}(\mathbf{p}_c)| \cdot |\mathbf{n}(\mathbf{p}_c)|}, \quad (9.16)$$

$$\text{und } \mathbf{r}(\mathbf{p}_c) = (x, 0, Z(x, y))^T, \quad (9.17)$$

$$\text{sowie } \mathbf{n}(\mathbf{p}_c) = \left(-\frac{\partial Z}{\partial x}(x, y), -\frac{\partial Z}{\partial y}(x, y), 1 \right)^T. \quad (9.18)$$

Dabei bezeichnen $\mathbf{r}(\mathbf{p}_c)$ den Ortsvektor zum Bodenpunkt \mathbf{p}_c ausgehend von der Sensorposition, die für jeden Punkt in der x - z -Ebene des Punktes angenommen wird. Die x -Richtung ist across-track und die z -Richtung bezeichnet

die Hochachse. $DI(\mathbf{p}_c)$ beschreibt den Wert der Antennencharakteristik für diesen Punkt und $TS(\mathbf{p}_c)$ die sedimentbedingte Rückstreustärke dort. Das Verfahren arbeitet auf einer 2,5D-Höhenkarte und die Betrachtung für jeden Punkt erfolgt in der x - z -Ebene. Dies ist in Abbildung 9.8 illustriert. Ein Oberflächenstück kann jedoch auch in y -Richtung (along-track) gekippt sein. Dies wird durch den Korrekturfaktor K berücksichtigt, der hier nicht weiter behandelt werden soll. Das Verfahren basiert auf Pseudo-Raytracing (siehe Abschnitt 7.7.2.2) und kann daher keine Oberflächensteigungen größer als $-z/x$ wiedergeben.

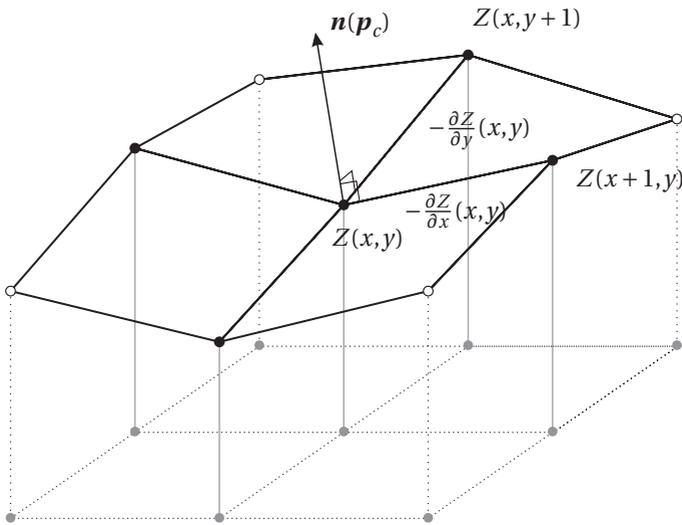


Abbildung 9.8: 2,5D Höhenkarte mit Erzeugung des Normalenvektors.

Dann wird ein Expectation-Maximization-Verfahren (EM) formuliert: Ein Fehlerterm E gibt die Abweichungen zu einer durch ein Vorwärtsmodell berechneten Sonarantwort \hat{I} wieder:

$$E = \sum_{x,y} (I(x,y) - \hat{I}(x,y))^2 . \quad (9.19)$$

Es werden dann iterativ die Parameter für Z , DI und TS gesucht, die den Fehlerterm minimieren. Ein Gradientenabstieg auf dem Fehlerterm verändert die Parameter in jedem Schritt. Dieser Ablauf ist in Abbildung 9.9 dargestellt. Durch die hohe Anzahl an Freiheitsgraden ist nach jedem Schritt

im Gradientenabstieg eine Regularisierung notwendig. Die Autoren legen dazu fest, dass für alle Sonarlinien die gleiche Antennencharakteristik DI gilt. In jeder Iteration wird daher der Median über alle Punkte gebildet, die im gleichen Winkel zum Sensor liegen und dieser dann in die Schätzung für DI zurückgeschrieben. Die Reflektanzwerte in Schattenbereichen werden durch die Reflektanz der umgebenden Pixel ersetzt. Auf Z findet keine Regularisierung statt. In der Folge müssen die Intensitätsschwankungen der Messung hauptsächlich von den Oberflächennormalen herrühren und man erhält eine Schätzung für Z . Die Schätzung erfolgt in einem Pyramidenansatz von grob zu fein, was laut den Autoren extrem wichtig für eine gute Konvergenz der Rekonstruktion ist. Die Berechnung geht laut den Autoren schnell, etwa 5 Minuten pro Eingabebild auf damals aktueller Hardware.

Das Verfahren wurde in Coiras et al. [Coi09a] auch an Bilder eines SAS angepasst, wobei die Glattheit der Oberfläche mit Federkräften modelliert wird und Polarkoordinaten verwendet werden. Dafür fallen die Schätzungen für die Antennencharakteristik und die Reflektanz weg.

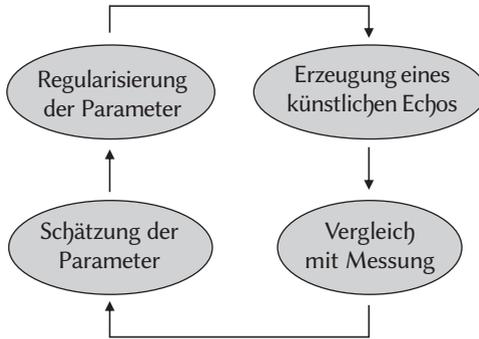


Abbildung 9.9: Schätzzyklus des Rekonstruktionsverfahrens nach Coiras et al. [Coi07]

9.4.2.2 Erweiterung

Wie bereits in Abschnitt 9.1 dargelegt, spielt die korrekte Beschreibung der Eigenbewegung der Aufnahmeplattform bei der Sidescan-Sonardatenauswertung eine wichtige Rolle.

Durch die Eintragung der Sonardaten in ein 2D-Gitter erfordert das Originalverfahren eine Geradeausfahrt des Unterwasserfahrzeugs, da die Nor-

malenberechnung durch die Nachbarpunkte im Pixelraster erfolgt (siehe Gleichung (9.18)). Dies ist in Abbildung 9.8 verdeutlicht. Prinzipiell wird bei Kartierungsmessungen zwar versucht, möglichst weite Strecken geradeaus zu fahren, jedoch sind die Daten, die während Wendemanövern aufgezeichnet werden, für das Verfahren unbrauchbar und unbeabsichtigte Abweichungen von der Geradeausfahrt wirken sich unmittelbar auf die geschätzte Geometrie aus.

Eine Fahrzeugeigenbewegung mit Nicken und Gieren sorgt dafür, dass falsche Nachbarschaftsbeziehungen entstehen [Woo11b]: Bei einer Kurvenfahrt tasten die Sonarsamples die Oberfläche in einer anderen Reihenfolge ab, als es durch die Verarbeitung in einem Pixelgitter suggeriert wird. Dies ist in Abbildung 9.10 dargestellt. Man sieht, dass sich die Nachbarschaftsbeziehung der Sonarsamples across-track, also innerhalb der Messung (lokale x -Richtung x_L), nicht ändert, wohl aber die Beziehung in Fahrtrichtung (lokale y -Richtung y_L).

Das Verfahren kann auf Kurvenfahrt erweitert werden, ohne das Verfahren insgesamt in Frage zu stellen [Woo12a; Woo12b]. Da durch die Kurvenfahrt lediglich die y_L -Gradienten fehlerhaft berechnet werden, müssen diese auf anderem Wege berechnet werden. In dem vorliegenden Fall wird für diese Berechnung eine Punktwolkenrepräsentation verwendet. Im Folgenden wird der wichtige Fall des Gierens des Fahrzeugs beschrieben. Für jede Messung $m_j \in \mathcal{B}$ liegen die Abtaststellen (Samples) der Sonarsamples in der Bodenebene entlang der jeweils senkrecht zur aktuellen Fahrtrichtung liegenden Geraden. Die Orientierung dieser Geraden ist durch die Fahrzeugeigenbewegung, im speziellen durch den Gierwinkel, vorgegeben. Für die Samples wird eine feste initiale Höhe angenommen. Die x_L -Gradienten können auf die gleiche Weise berechnet werden wie bisher, wohingegen die y_L -Gradienten an den Abtaststellen über die Nachbarschaft auf der Punktwolke berechnet werden.

Dabei ergibt sich die Schwierigkeit, dass eine naive Normalenschätzung über die k nächsten Nachbarn auf der Punktwolke fast immer fehlschlägt. Der Grund dafür ist, dass aufgrund der hohen Sampeldichte in Across-Track-Richtung beinahe ausnahmslos Nachbarpunkte aus der gleichen Messung herangezogen werden. Schon ein kleiner Gierwinkel zwischen den Messungen bringt die Samples der Linien in den Randbereichen in along-track weit auseinander.

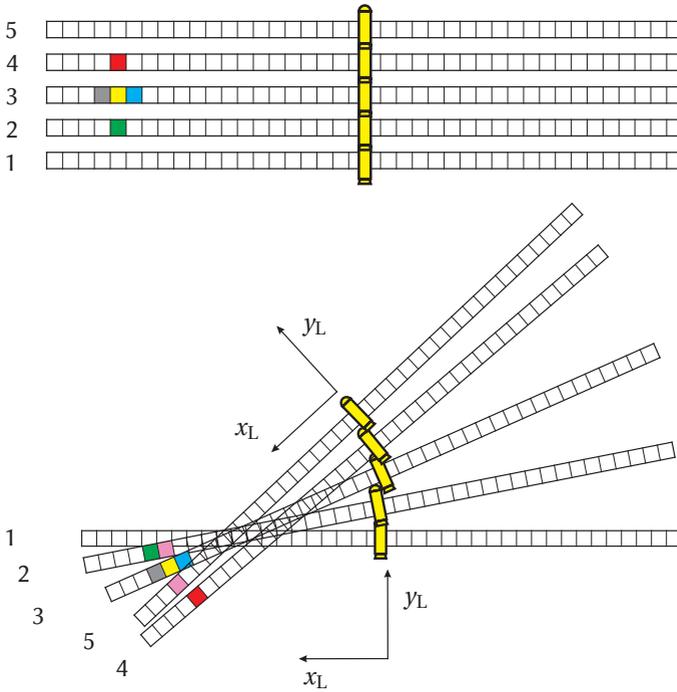


Abbildung 9.10: Die Sonarzeilen sind in Aufnahmereihenfolge nummeriert. *Oben:* Nächste Nachbarn für das gelb markierte Sample im 2D-Gitter bei Stapelung der Sonarzeilen. *Unten:* Nächste Nachbarn aus 2D-Gitter angewendet auf Kurvenfahrt ergibt falsche Nachbarschaftsbeziehungen. Die korrekten nächste Nachbarn sind in rosa markiert. Man beachte, dass das rote und grüne Sample in der Originalzuordnung die örtliche Reihenfolge umgekehrt beschreiben.

Die Punkte auf der gleichen Linie tragen jedoch gerade nichts zur Konstruktion des Gradienten in y_L -Richtung bei, da sie keine Information über die Bodenform in Along-Track-Richtung tragen. Dies ist in Abbildung 9.11 verdeutlicht. Die gesuchte Information muss demnach aus den anderen Sonarzeilen extrahiert werden. Dies geschieht wie folgt: Es werden Punktwolken \tilde{C}_j gebildet, in denen alle Sonarzeilen q_i aus der Menge der Beobachtungen \mathcal{B} bis auf Zeile q_j enthalten sind:

$$\tilde{C}_j := \bigcup_{i \neq j} \{q_i\}. \tag{9.20}$$

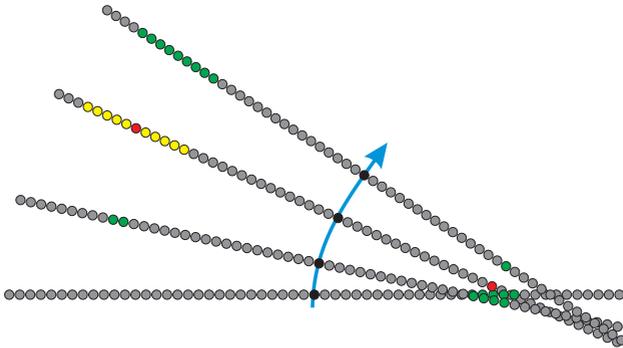


Abbildung 9.11: Bestimmung der Samples zur Normalenberechnung: Wird eine feste Zahl an benachbarten Samples gewählt, ist inhärent eine Adaption an die Samplingdichte gegeben. Zusätzlich wird gefordert, dass Samples nicht aus der Anfragelinie stammen sollen (gelb), sondern aus benachbarten Linien (grün).

Zur Bildung des Normalenvektors ist \bar{C}_j die Anfragemenge für Anfragepunkte aus der Sonarlinie q_j . Die Normale zu jedem Anfragepunkt wird über eine Hauptkomponentenanalyse der Streumatrix der k nächsten Nachbarpunkte gewonnen²⁸. Die Orientierung der Normale wird so gewählt, dass sie in positive z -Richtung zeigt, da eine 2,5D-Höhenkarte geschätzt wird. Die Bestimmung der Normalen über die k nächsten Nachbarn erlaubt es, trotz der sehr unterschiedlichen Samedichte eine gültige Normale zu schätzen. Das wäre bei Normalen, die aus Punkten in einem festen Radius gebildet werden, nicht der Fall. Dort könnte es ebenso passieren, dass innerhalb des festen Radius zu wenige oder gar keine geeigneten Punkte zu finden sind (siehe Abbildung 9.12). Der über die k nächsten Nachbarn gewonnene 3D-Normalenvektor \mathbf{n}_{3D} wirkt damit in dünn besetzten Bereichen stark glättend.

Aufgrund der Entstehung aus der Hauptkomponentenanalyse enthält der Vektor \mathbf{n}_{3D} typischerweise auch noch Beiträge in x_L -Richtung. Diese Beiträge in x_L -Richtung werden nicht benötigt, da die Normalenkomponente in x_L -Richtung wie im Ursprungsverfahren aus der Sonarlinie selbst gewonnen wird. Dazu lässt sich der Vektor \mathbf{n}_{3D} in die lokale x_L -Komponente \mathbf{n}_{x_L} und eine Komponente $\mathbf{n}_{y_L,z}$ senkrecht zur aktuellen Sonarlinie (y_L,z) zerlegen.

²⁸ Dieses Verfahren wird von der PCL-Bibliothek zur Verfügung gestellt.

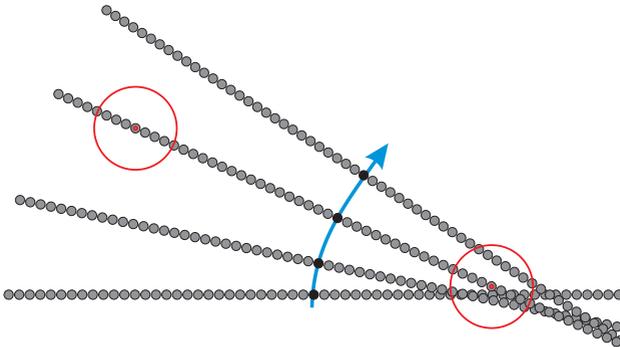


Abbildung 9.12: Nächstegelegene Samples in einem festen Abstand. Es kann vorkommen, dass ausschließlich Samples aus der Anfragelinie innerhalb dieses Abstands zu liegen kommen. Mit diesen kann keine Normale senkrecht zur Fahrtrichtung geschätzt werden.

Dies geschieht durch Projektion auf die y_L - z -Ebene, die senkrecht zur x_L -Richtung steht. Aus dem erhaltenen Vektor $\mathbf{n}_{y_L,z}$ lässt sich dann die im Verfahren gebrauchte Größe $-\frac{\partial Z}{\partial y}(x,y)$ berechnen. Diese Konstruktion ist in Abbildung 9.13 dargestellt.

Die Anzahl an Anfrage-Punktwolken \bar{C}_j ist genauso groß wie die Gesamtzahl der betrachteten Messungen in \mathcal{B} . Da dies eine große Rechenbelastung mit sich bringt, wird ein sliding-window-Ansatz verfolgt, bei dem immer eine vorgegebene Menge an Sonarzeilen verwendet wird. Die Fenster enthalten nicht nur neue Messungen, sondern überlappen (siehe Abbildung 9.14). Das hat den Vorteil eines konstanten und vorab bekannten Rechenaufwands. Dies muss abgewogen werden gegen die Tatsache, dass dann nicht alle jemals an einem Ort gemachten Messungen verwendet werden.

Im Hinblick auf SLAM-Anwendungen ist demnach ein Ansatz basierend auf Subkarten naheliegend, bei dem innerhalb der Subkarten das vorgestellte Verfahren zum Einsatz kommt und die Subkarten untereinander durch andere Verfahren gegeneinander referenziert werden, beispielsweise ICP (*iterative closest point*) oder das Subkartenverfahren von Aulinas [Aul11b].

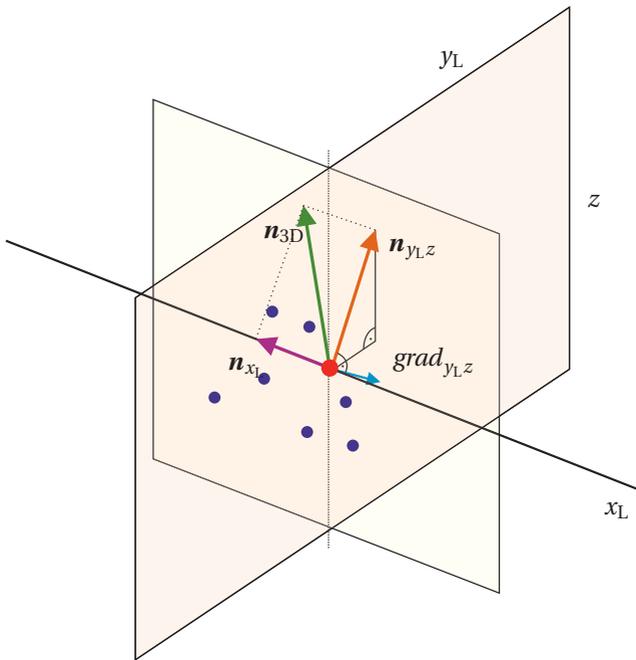


Abbildung 9.13: Berechnung der Normalenvektor-Projektionen aus Normalenvektor der Punktwolke.

9.4.3 Rekonstruktion mittels Kernelalphabeten

9.4.3.1 Motivation

Im Entfernten ist die Idee für die kernelbasierte Oberflächenrekonstruktion durch die Arbeit von Hadsell [Had10] entstanden, in der ein Landroboter eine kernelbasierte Oberflächenschätzung aus Laserscannerdaten erzeugt.

Das folgende Verfahren entstand aus der Motivation, eine schritt haltende Rekonstruktion zu entwickeln, die ausreicht, um die Navigation stützen zu können. Im Gegensatz zum vorhergehenden Verfahren in Abschnitt 9.4.2 wird nicht versucht, eine möglichst naturnahe Oberfläche zu schätzen, die für einen menschlichen Betrachter gedacht ist, sondern die geschätzte Oberfläche soll direkt in einer Repräsentation geschätzt werden, die für die Navigationsstützung zugänglich ist [Woo13b; Woo13a].

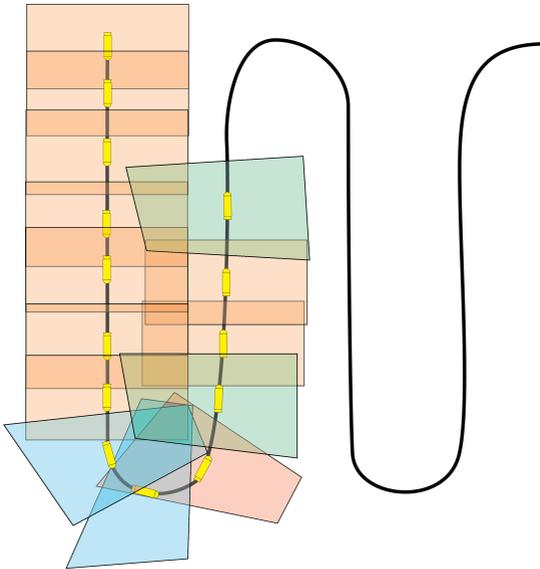


Abbildung 9.14: Zusammensetzen der Gesamtkarte aus Subkarten.

Damit lässt sich die Komplexität der SLAM-Aufgabe senken (Abbildung 9.15), da ein Zwischenschritt eingespart wird, der auf einer geschätzten Rekonstruktion versucht, Features zu extrahieren. Außerdem lässt sich steuern, bis zu welcher Detaillierung eine Rekonstruktion erfolgen soll.

In der vorliegenden Arbeit wird eine Oberfläche in Kernaldarstellung gewählt, da dies die Anzahl der zu schätzenden Parameter stark senkt und daher auch starke Vereinfachungen vornimmt (Abbildung 9.16). Die Kernelrepräsentation der Oberfläche stellt damit bereits eine starke Regularisierung dar. Die gewählte Kernelform ist symmetrisch und entspricht daher nicht der in Abschnitt 9.4.1 gezeigten tangentialen Rekonstruktion.

9.4.3.2 Kurzüberblick über das Verfahren

Das Verfahren schätzt für jede Sonarmessung zunächst eine Darstellung der Oberfläche bestehend aus einer Menge von 1D-Kernen auf einem ebenem Untergrund, die zusammen die Oberfläche repräsentieren. Dazu wird die Messung mit per Sonar-Raytracing vorberechneten Kernel-Sonarantworten

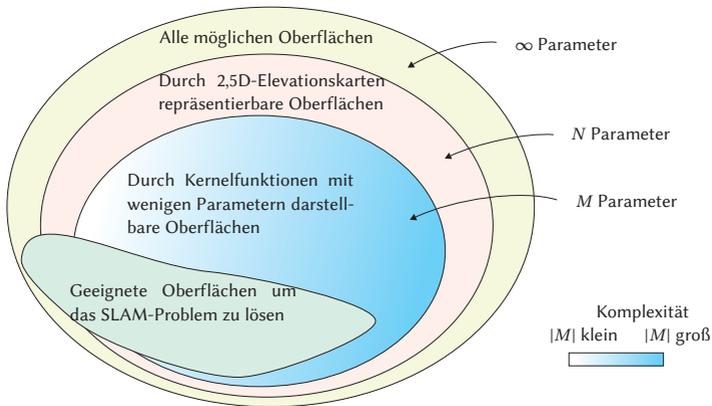


Abbildung 9.15: Einteilung von Oberflächen nach ihrer Komplexität und Eignung für Navigationsaufgaben

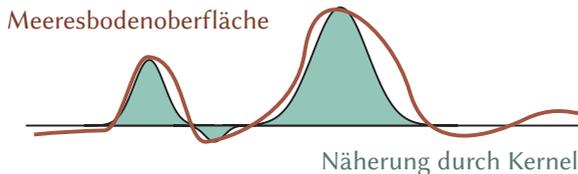


Abbildung 9.16: Näherung eines felsigen Terrains auf dem Meeresboden durch eine Kernendarstellung. Details der Oberfläche gehen dabei verloren.

(»Alphabeteinträgen«) verglichen und es werden iterativ Kernels in einem Greedy-Verfahren zur geschätzten Oberfläche hinzugefügt, bis die Messung gut erklärt wird bzw. eine Maximalzahl von gewünschten Kernels erreicht ist. Diese Repräsentation als Linearkombination von Sonarantworten geschieht unter wissentlicher Inkaufnahme eines Fehlers der durch Nichtlinearitäten in der Sonarabbildung entsteht. Trotz dieses Fehlers können die wesentlichen Oberflächenmerkmale rekonstruiert werden.

Es wurde des Weiteren untersucht, inwieweit Gradientenabstiegsverfahren hilfreich sein können, um eine vollständige Suche im Fehlerraum zu vermeiden oder um bei Parametervektoren, die nicht vorberechnet wurden, eine genauere Schätzung zu ermöglichen. Die Schätzungen mehrerer Messungen werden dann auf einer globalen 2,5D-Karte fusioniert.

9.4.3.3 Definitionen und Parameterraum

Zunächst wird das Verfahren mit seinen Bezeichnungen im 1D-Fall vorgestellt [Woo14a], bevor es später in Abschnitt 9.4.3.14 auf den 2,5D-Fall erweitert wird. Eine Sonarmessung \mathbf{m} besteht aus zeitlich angeordneten Intensitäts-Abtastwerten (Samples), wobei jedes Sonarsample die Summe aller in einer Zeitscheibe t_i am Sensor eingetroffenen Rückstreuwerte repräsentiert:

$$\mathbf{m} := (s_1, \dots, s_{S_m}). \quad (9.21)$$

T_{rec} stellt die Empfangsdauer zwischen dem Aussenden eines Pulses und der Aussendung des nächsten Pulses dar. Dadurch ist die Reichweite $r_s = cT_{rec}$ bestimmt. Die Samplezahl S_m ist für jede Messung gleich und frei wählbar.

Die durch Sonar-Raytracing \mathcal{S} berechnete Sonarantwort eines flachen Meeresbodens z_F ist folgendermaßen gegeben:

$$\mathbf{m}_F := \mathcal{S}(z_F). \quad (9.22)$$

Statt konkret geformten Objekten auf dem Meeresboden sollen zur Verallgemeinerung Objekte in Form von Gauß'schen Kernelfunktionen betrachtet werden. Es wird die Annahme gemacht, dass sich eine natürliche und damit beliebig genaue Oberflächenform Z des Meeresbodens durch eine Summe von parametrisierten Kernen beschreiben lässt:

$$Z(x) \approx Z_{\mathcal{G}}(x) := z_F(x) + \sum_g k_g(h, w, p), \quad \text{mit } g \in \mathcal{G}, \quad (9.23)$$

wobei \mathcal{G} die Menge aller Kernels beschreibt, die benötigt werden, um Z in einer bestimmten Auflösung komplett fehlerfrei wiederzugeben. k bezeichnet einen Kernel. Der betrachtete Parameterraum für die Kernelplatzierung eines Kernels k ist seine Breite (w , entsprechend der Standardabweichung σ der Gaußfunktionen), seine Höhe (h) und die Position eines Kernels (p), wobei Position hier den Across-Track-Abstand (in x_L -Richtung) in Ground-Range-Koordinaten zum Nadir bezeichnet. Ein Kernel ist also ein Höhenprofil der folgenden Form:

$$k(h, w, p) := h \cdot e^{-\frac{(x-p)^2}{2w^2}}. \quad (9.24)$$

Die Erstellung einer synthetischen Sonarantwort zu einem Terrain mit einem Einzelkernel geschieht über die Sonar-Vorwärtssimulation \mathcal{S} , wie sie in Abschnitt 8.3 beschrieben ist:

$$\mathbf{m}_{k(h, w, p)} := \mathcal{S}(z_F + k(h, w, p)). \quad (9.25)$$

9.4.3.4 Linearitätsannahme

Die zurückgestreuten Intensitätswerte in einer Sonarmessung hängen nicht linear von der Oberflächengeometrie ab. Durch die Aufnahme von der Seite entstehen Abschattungseffekte. Die im Schatten eines anderen Objekts liegenden Oberflächenteile tragen dadurch überhaupt nicht zur Messung bei. Diese nichtlinearen Effekte können durch Sonar-Raytracing (\mathcal{S}), wie es in Abschnitt 8.3 beschrieben ist, zwar abgebildet werden, jedoch ist Raytracing vergleichsweise langsam und daher für die beabsichtigte Echtzeitanwendung schlecht geeignet.

Die Idee hinter dem hier vorgestellten Verfahren ist die, dass zwei Objekte auf ebenem Meeresboden die Sonarmessung nicht gegenseitig beeinflussen, wenn der Abstand zwischen ihnen »groß genug« ist, so dass die Bereiche, in denen Schatten geworfen werden, disjunkt sind. Dann kann der Beitrag zweier Objekte zur Sonarmessung linear kombiniert werden. Die Länge des Schattenwurfs hängt bei gegebener Flughöhe allerdings sowohl von der Höhe als auch von der Position des Objekts ab. Dass ein ebener Meeresboden angenommen wird, ist eine vergleichsweise schwache Annahme, da der Meeresboden in großen Bereichen tatsächlich sehr flach ist (siehe Abschnitt 2.9). Es wird also angenommen, dass sich Sonarantworten von einzelnen Gaußkernen linear kombinieren lassen, wenn sie weit genug auseinander liegen, um sich nicht zu stören. Das bedeutet genauer, wenn Sie nicht aufeinander liegen und der Schatten eines Kerns keinen anderen Kernel trifft. Dazu definieren wir den Sonarsupport eines Kerns wie folgt:

$$\mathcal{U}(k(h, w, p)) := \{s \mid \mathbf{m}(s_i) - \mathbf{m}(s_{F,i}) \neq 0\}, \quad (9.26)$$

wobei $s_{F,i}$ das zugehörige Sample aus der Antwort des flachen Meeresbodens \mathbf{m}_F kennzeichnet. Der Support \mathcal{U} bezeichnet also die Bereiche der Sonarantwort, in denen der Kernel eine Änderung gegenüber der Sonarantwort eines flachen Meeresbodens hervorruft.

Die Linearitätsannahme lässt sich also wie folgt formalisieren:

$$\mathbf{m}_F + \sum_i \mathcal{S}(k_i(h, w, p)) = \mathcal{S}\left(z_F + \sum_i k_i(h, w, p)\right), \quad (9.27)$$

$$\text{wenn } \bigcap_i \mathcal{U}(k_i(h, w, p)) = \emptyset. \quad (9.28)$$

Dass die Kernel genügend weit auseinanderliegen und Gleichung (9.27) damit exakt erfüllt ist, dürfte in der Praxis eher die Ausnahme als die Regel sein. Wenn die Verletzung der Bedingung in Gleichung (9.28) nicht zu stark ist, wird angenommen, dass Gleichung (9.27) immerhin noch mit \approx statt $=$ gilt. Das Verfahren zeigt, dass auch bei absichtlicher Vernachlässigung der Abstandsbedingung 9.28 eine gute Schätzung für relevante Oberflächenmerkmale erreicht werden kann, wie sie zur Stützung der Navigation benötigt werden.

9.4.3.5 Wahl der Kernelfunktion

Es wurden Kernels mit örtlich scharf begrenztem Support nach Wu bzw. Wendland [Sch95] untersucht, um einen fest abgegrenzten Einflussbereich der Kernels sicherzustellen. Diese sind in Abbildung 8.3 abgebildet und sind in Gleichung (8.2) definiert. Der beschränkte Support stellte sich jedoch beim Gradientenabstieg (später in Abschnitt 9.4.3.12) als nachteilig heraus, weshalb Gaußkernels eingesetzt werden. Darüber hinaus existieren zur mathematischen Handhabung von Gaußkernels etablierte Werkzeuge.

9.4.3.6 1D-Verfahren

Ziel ist nun das Finden einer Menge $\mathcal{K} = \{k_i(h, w, p)\}$ (oder kurz $\mathcal{K} = \{k_i\}$) derart, dass gilt

$$\mathcal{S}\left(z_F + \sum_{k_i \in \mathcal{K}} k_i\right) \approx \mathbf{m}, \quad (9.29)$$

denn damit soll gemäß Gleichung (9.27) einhergehen, dass diese Menge die Oberfläche approximiert und daher auch gilt:

$$Z \approx z_F + \sum_{k_i \in \mathcal{K}} k_i. \quad (9.30)$$

Darüber hinaus soll \mathcal{K} eine deutlich geringere Mächtigkeit besitzen als \mathcal{G} um für Navigationsanwendungen handhabbar zu bleiben.

Im folgenden wird ab und zu Bezug auf Kenngrößen genommen, die von statistischen Normalverteilungen bekannt sind, da diese ebenso die Form der Gauß'schen Glockenkurve verwenden. Allerdings soll dem Leser immer klar sein, dass die Kernels k_i keine Wahrscheinlichkeitsverteilung repräsentieren. Daher wurde bei der Notation absichtlich darauf verzichtet die üblichen Bezeichner für Standardabweichung σ und Erwartungswert μ zu verwenden.

9.4.3.7 Erzeugung der 1D-Grundwahrheit

Um das Verfahren evaluieren zu können, werden Daten mitsamt zugehöriger Grundwahrheit benötigt. Da trotz mehrerer Kontaktversuche weder reale Messdaten zu bekommen waren, die zu einer geometrisch genau bekannten Umgebung gehören, noch simulierte Messdaten aus Simulatoren anderer Anwender zu bekommen waren, musste die Datenaufnahme ebenfalls simuliert werden. Im 1D-Fall kommt die profillinienbasierte Simulation aus Abschnitt 8.2.1 zum Einsatz.

Zunächst wurde eine Oberfläche aus einer Menge von Grundwahrheitskernen \mathcal{G} mit zufälligen Parametern als Grundwahrheit erzeugt. Es werden sehr viel mehr Kernel zur Erzeugung der Oberfläche verwendet als später rekonstruiert werden sollen. Dabei können diejenigen Kernel, die von anderen Kernen abgeschattet werden, grundsätzlich nicht rekonstruiert werden. Außerdem ist zu erwarten, dass nahe beieinanderliegende Kernel, bei denen die Linearitätsannahme besonders stark verletzt ist, am schlechtesten rekonstruiert werden können. Die Kernelform entspricht derjenigen des Rekonstruktionsalgorithmus, was eine einfachere Zuordnung bei der Auswertung ermöglichen soll:

$$Z_{\mathcal{G}} = z_F + \sum_{g \in \mathcal{G}} k_g(h, w, p), \quad (9.31)$$

$$\mathbf{m}_{Z_{\mathcal{G}}} = \mathcal{S}(Z_{\mathcal{G}}) = \mathcal{S}\left(z_F + \sum_{g \in \mathcal{G}} k_g(h, w, p)\right). \quad (9.32)$$

Die Grundwahrheit im 1D-Fall wurde mit einer inkohärent arbeitenden Sonarsimulation erstellt, die keine Interferenzeffekte berücksichtigt und damit komplett speckle-rauschfrei arbeitet (siehe Abschnitt 8.2.1).

9.4.3.8 Schätzung der Oberfläche – Auswahl der Kernel für die Rekonstruktion

Das Verfahren arbeitet iterativ und versucht die Differenz einer gewonnenen Sonarmessung zur Sonarantwort eines flachen Meeresbodens mithilfe von Kernen zu erklären, indem nach einem greedy-Verfahren immer dort Kernels gesetzt werden, wo der Unterschied zwischen Messung und Simulation am größten ist. Diese differentielle Messung wird wie folgt beschrieben:

$$\mathbf{m}^{-F} = \mathbf{m} - \mathbf{m}_F. \quad (9.33)$$

Dies ist in Abbildung 9.17 anhand einer synthetischen Messung mit drei weit auseinanderliegenden Kernen veranschaulicht. Im Folgenden wird zur Vereinfachung der Notation der Parametervektor $\mathbf{p} := (h, w, p)$ geschrieben. Der differentielle Beitrag ist diejenige Änderung der Sonarantwort, die der Kernel einem ebenen Meeresboden hinzufügt. Dies kann folgendermaßen formalisiert werden:

$$\mathbf{a}_{\mathbf{p}} := \mathcal{S}(z_F + k(\mathbf{p})) - \mathbf{m}_F = \mathbf{m}_{k(h, w, p)} - \mathbf{m}_F. \quad (9.34)$$

Dann wird in einem Iterationsschritt u derjenige Kernel $k(\mathbf{p})$ als nächster Kernel der Menge \mathcal{K} hinzugefügt, dessen Parametervektor \mathbf{p} ein Fehlermaß E zwischen Messung \mathbf{m}^{-F} und differentiellem Beitrag $\mathbf{a}_{\mathbf{p}}$ optimiert. Je nach verwendetem Fehlermaß ist dies eine Minimierung oder eine Maximierung:

$$\mathbf{p} = \underset{\mathbf{p}'}{\operatorname{argopt}} E(\mathbf{m}_u^{-F}, \mathbf{a}_{\mathbf{p}'}) . \quad (9.35)$$

Nachdem der am besten passende Kernel gefunden wurde, wird dessen differentielle Beitrag $\mathbf{a}_{\mathbf{p}}$ von dem zu schätzenden Rest abgezogen und eine neue Iteration beginnt:

$$\mathbf{m}_{u+1}^{-F} = \mathbf{m}_u^{-F} - \mathbf{a}_{\mathbf{p}}. \quad (9.36)$$

Es liegen zwei Abbruchkriterien für die Iteration nahe: Entweder möchte man, dass die Approximation in der Sonardomäne einen bestimmten Maximalfehler E_{max} unterschreitet,

$$E(\mathbf{m}_u^{-F}, \mathbf{a}_{\mathbf{p}}) < E_{max}, \quad (9.37)$$

oder man möchte aus Komplexitätsgründen nur eine Maximalzahl an Kernen schätzen

$$u = |\mathcal{K}| = K_{max}. \quad (9.38)$$

Das Schätzergebnis für die Oberfläche ist dann also:

$$Z_{\mathcal{K}} := z_F + \sum_{j \in \mathcal{K}} k_j(h, w, p). \quad (9.39)$$

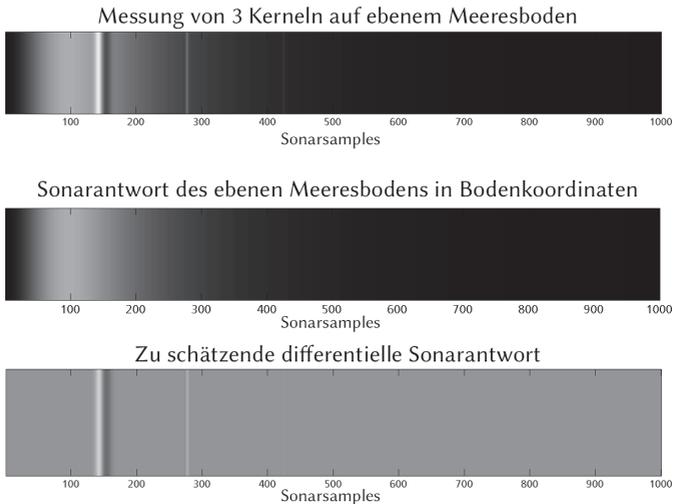


Abbildung 9.17: Konzept des Schätzvorgangs anhand einer Sonarzeile: Von einer Messung (oben) wird der Beitrag des ebenen Meeresbodens (mitte) abgezogen. Daraus ergibt sich die zu schätzende differentielle Sonarantwort (unten). Die Messung wurde zur besseren Darstellung in die Höhe gezogen. Die Sonarantwort des dritten, sehr kleinen Kernels etwa bei Sample 420 ist äußerst schwach und daher im Bild möglicherweise schwer zu sehen.

9.4.3.9 Gewichtung

Da der Kontrast innerhalb der \mathbf{a}_p dort am höchsten ist, wo die Sonarhauptkeule den Boden trifft, ist eine Gewichtung erforderlich, um zu vermeiden, dass bevorzugt in diesem Bereich Kernels platziert werden. Dies geschieht

mit folgender heuristischen Gewichtungsfunktion $w_{beam}^k(s_j)$, die in Abbildung 9.18 dargestellt ist:

$$w_{beam}^k(s_j) := \frac{F_{m_F}}{10(\frac{1}{\xi} + \psi s_j)}, \quad (9.40)$$

$$\text{mit } F_{m_F} := \sum_j^{S_m} s_j \quad \text{wobei } s_j \in m_F. \quad (9.41)$$

Dabei stellt ξ einen Skalierungsfaktor dar, der die Größenordnung der Gewichte festlegt und ψ bestimmt, wie stark die inverse Gewichtung durch die Intensitätswerte eingeht. Diese Werte müssen empirisch bestimmt werden. In dieser Arbeit werden folgende Werte verwendet: $\xi = 5$, $\psi = 0.25$.

Wird ein Kernel ausgewählt, wird die Gewichtungsfunktion im Bereich des Kernsupports \mathcal{U} dieses Kernels verringert. Dadurch werden im weiteren Schätzverlauf dortige Kernelplatzierungen unwahrscheinlicher. Das Verfahren bestraft, dass Kernels nah beieinander platziert werden, denn dadurch wird die Linearitätsannahme sicher verletzt. Eine Reduktion der Gewichte auf null, was einem Platzierungsverbot gleichkommt, brachte jedoch eher schlechtere Schätzergebnisse.

Der Kernsupport \mathcal{U} weist am Nulldurchgang zwischen Schlaglicht und Schatten eine Lücke auf. Diese ist für die Gewichtung nicht gewünscht und wird durch Faltung mit einer Fensterfunktion weggeglättet. Damit ergibt sich für die Aktualisierung der Gewichte nach der Platzierung eines Kernels:

$$w_{beam, neu}^k(s_j) := w_{beam, alt}^k(s_j) - b_{\mathcal{U}} w_{\mathcal{U}}^k(s_j), \quad (9.42)$$

$$\text{mit } w_{\mathcal{U}}^k(s_j) := \chi_{\mathcal{U}} * w_{BHFT}(n). \quad (9.43)$$

Danach besteht die Gewichtungsfunktion w_{beam}^k über dem Kernsupport aus einem zusammenhängenden Intervall, wie es in Abbildung 9.18 dargestellt ist. Wie stark die Abgewichtung erfolgt, wird durch den Parameter $b_{\mathcal{U}}$ festgelegt und wird ebenfalls empirisch bestimmt. Durch die Faltung wächst der Einflussbereich der Funktion insgesamt noch etwas an den Rändern des Supports, so dass dort ebenfalls weitere Platzierungen bestraft werden.

Die Gewichtungsfunktion erlaubt es, auch Informationen aus anderen Modalitäten in das Schätzverfahren zu integrieren, um ein fusioniertes Schätzergebnis zu bekommen [Woo15b]. Z.B. könnte man aus optischen Aufnahmen die Information erhalten, dass in einem bestimmten Entfer-

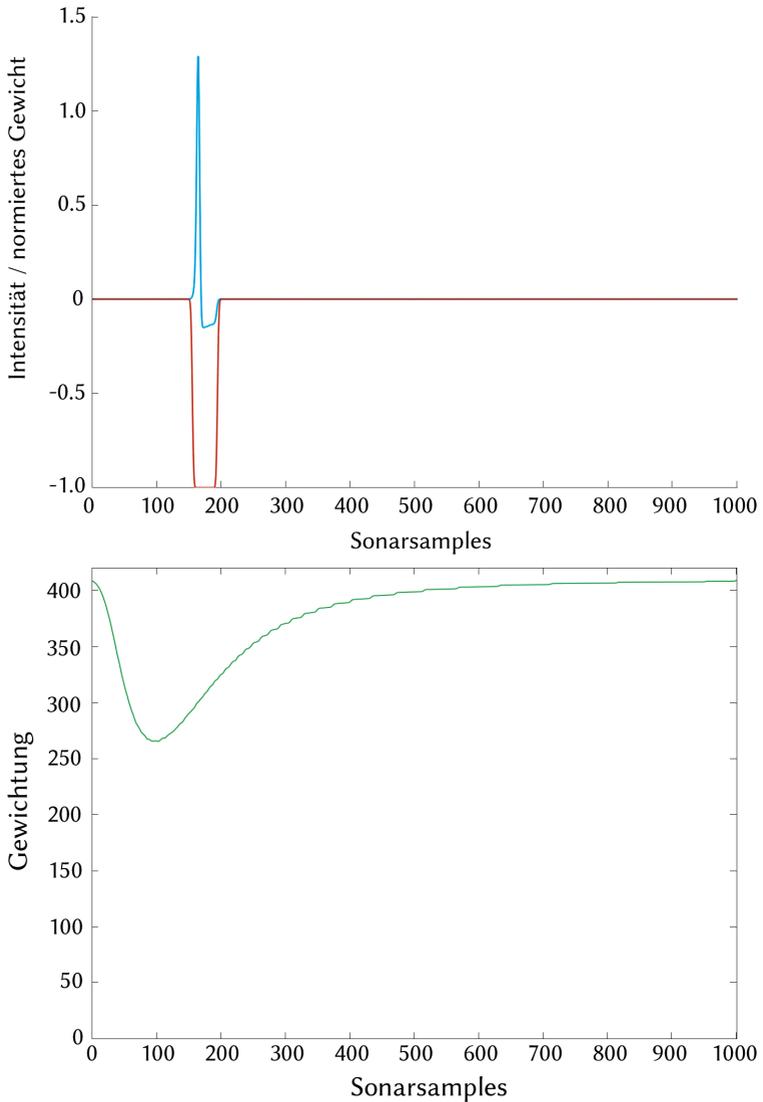


Abbildung 9.18: *Oben:* Dargestellt ist ein differentieller Beitrag eines Kernels \mathbf{a}_p (blau) und die aus dem Support \mathcal{U} resultierende normierte Gewichtungsfunktion $w_{beam}^k(s_j)$ (braun). *Unten:* Gewichtungsfunktion invers zur Antennencharakteristik in der Sonardomäne w_{beam}^k .

nungsbereich keine Objekte im Kamerabild sichtbar sind. Durch Senkung der Gewichte in diesem Entfernungsbereich wird eine Kernplatzierung dort unwahrscheinlicher.

9.4.3.10 Fehlermaße

Es wurde evaluiert, welche Fehler- bzw. Ähnlichkeitsmaße

$$E(\mathbf{m}_u^{-F}, \mathbf{a}_p) \quad (9.44)$$

geeignet sind, um die Übereinstimmung zwischen Messung und Alphabeteintrag so zu beschreiben, dass die Kernel sinnvoll platziert werden. Untersucht wurden folgende Fehlermaße, die auch die vorgenannte Gewichtungsfunktion berücksichtigen. Der Übersichtlichkeit halber wird die Notation in den Formeln in Gleichung (9.51) aufgeweicht und s_i bezeichnet den Intensitätswert des zugehörigen Samples aus \mathbf{m}_u^{-F} und $s_{i,a}$ den Intensitätswert des zugehörigen Samples aus \mathbf{a}_p :

$$E_{abs,sq,trip,quadr} := \sum_i^{S_m} w_i^k \cdot |s_i - s_{i,a}|^l \quad l \in \{1,2,3,4\}, \quad (9.45)$$

$$E_{log} := \sum_i^{S_m} w_i^k \cdot \log(|s_i - s_{i,a}|), \quad (9.46)$$

$$E_{minmax} := \max(w_i^k \cdot (|s_i - s_{i,a}|)). \quad (9.47)$$

Außerdem wurden noch folgende Ähnlichkeitsmaße untersucht:

$$E_{emp.correl} := \frac{\sum_i (s_i - \mu_s) \cdot (s_{i,a} - \mu_{s_{i,a}})}{\sqrt{\sum_i (s_i - \mu_s)^2 \cdot \sum_i (s_{i,a} - \mu_{s_{i,a}})^2}}, \quad (9.48)$$

$$E_{R^2 \text{ goodness of fit}} := (E_{emp.correl})^2, \quad (9.49)$$

$$\text{wobei } \mu_s := \frac{1}{S_m} \sum_j^{S_m} s_j \quad \text{mit } s_j \in \mathbf{m}_u^{-F} \quad \text{und} \quad (9.50)$$

$$\mu_{s_{i,a}} := \frac{1}{S_m} \sum_j^{S_m} s_j \quad \text{mit } s_j \in \mathbf{a}_p \quad \text{gilt.} \quad (9.51)$$

Für den empirischen Korrelationskoeffizienten und für das R^2 »goodness of fit« Maß entspricht der Optimierungsoperator (opt) aus Gleichung (9.35) dem Maximierungsoperator (max). Für die Restlichen Fehlermaße entspricht er dem Minimumsoperator (min).

Über mehrere Szenarien hinweg erzielte das quadratische Fehlermaß E_{sq} die besten und konsistentesten Ergebnisse. Wenn nichts anderes genannt ist, wird im Folgenden jeweils E_{sq} verwendet.

9.4.3.11 Vorberechnung von Sonarantworten (»Alphabeten«) durch Raytracing

Wird das Sonar-Raytracing während des Schätzvorgangs durchgeführt, bringt die Linearitätsannahme keine Vorteile, sondern eher Nachteile, da für jeden Kernel ein eigener Raytracing-Vorgang durchgeführt werden muss und Fehler durch die Linearitätsannahme hinzukommen. So wäre das Verfahren langsamer und schlechter. Der Vorteil der Linearitätsannahme liegt darin, dass sich die Raytracing-Berechnungen für die Einzelkernel vorberechnen und in einem »Sonaralphabet« ablegen lassen. So müssen nur noch die Ergebnisse der Einzelkernel zusammengesetzt werden.

Natürlich können aufgrund der kontinuierlichen Parameter nicht alle beliebigen Kernel $k(h, w, p)$ vorberechnet werden. Durch Vorwissen kann aber ein geeigneter Parameterraum ausgewählt und diskretisiert werden, für den eine Vorberechnung stattfindet. Als Alphabeteintrag wird nicht die Sonarantwort eines Einzelkernels abgelegt, sondern der differentielle Beitrag $\mathbf{a}(h, w, p) = \mathbf{a}_p$, den dieser Kernel gegenüber eines ebenen Meeresboden leistet. Die Einträge bestehen aus Sonarsamples mit positiven Werten für stark reflektierende Bereiche und negativen Werten für abgeschattete Bereiche (siehe Abschnitt 9.4.3.9).

In diesem Rekonstruktionsverfahren wurde nicht die Standardeinstellung des Simulators aus Abschnitt 8.3.1 verwendet: Der Öffnungswinkel des Sonars betrug nicht 60° sondern 84° , damit ein Bereich, der exakt am Nadir beginnt, bis zur Maximalreichweite abgedeckt wird. Dies erleichtert die Simulation, da bei der Erstellung der Szenarien nicht auf die Nadirlücke Rücksicht genommen werden muss. Diese Wahl stellt aber keine Einschränkung an das Verfahren dar, sogar im Gegenteil: Bei Kernen nahe des Nadir tritt der Layovereffekt auf. Dies ist in Abbildung 9.19 gut im oberen linken Eck zu sehen. Das Sonaralphabet wird mit der rauschfreien Sonarsimulation erstellt,

denn es ist nicht sinnvoll, eine Messung gegen eine Referenz abzugleichen, die bereits eine Instantiierung eines Rauschvorgangs beinhaltet. Hat man Vorwissen über die zu erwartende Verteilung von Kernelhöhen oder -breiten, kann man auch dieses Vorwissen in die Wahl des Parameterraums einbringen.

Durch die Vorberechnung der Sonardaten gibt es eine Ähnlichkeit des Verfahrens zu Bag-Of-Words-Ansätzen, jedoch ist die Positionierung der Kernel über die Gewichtungsfunktion gekoppelt und nicht unabhängig.

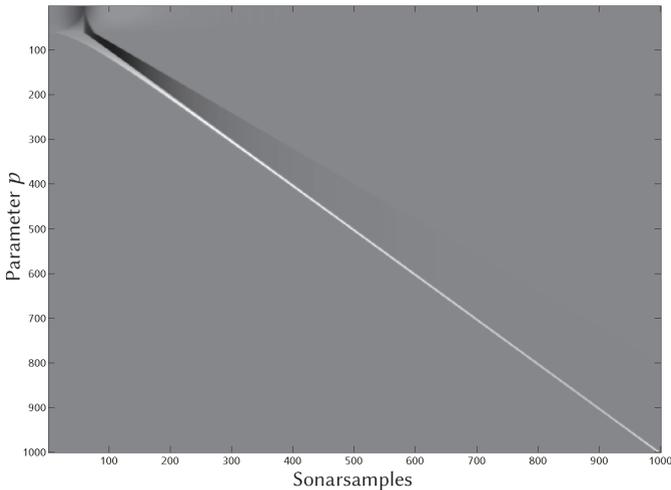


Abbildung 9.19: Alphanoteinträge dargestellt als gestapelte differentielle Sonarantworten für $\mathbf{p} = \{(4, 0.01, p) \mid p = 0.2 * k \text{ mit } 0 \leq k < 1000, k \in \mathbb{N}\}$. Das sind alle differentielle Sonarbeiträge eines schmalen aber hohen Kernels. Dargestellt sind alle Kernelpositionen vom Nadir (erste Zeile) bis zur Maximalreichweite (unterste Zeile). Man sieht, dass die Schatten in Bereichen mit niedrigen Signalstärken aufgrund der Antennencharakteristik weniger stark ausgeprägt sind. Außerdem sieht man in der oberen linken Ecke den Einfluss des Layover-Effekts (Abschnitt 6.3.3.4) für Kernels nahe des Nadir.

9.4.3.12 Gradientenabstieg in der Fehlerfunktion

Es wurde untersucht, inwieweit eine Suche mit Gradientenabstieg über das Fehlermaß statt der vollständigen Suche eingesetzt werden kann. Die Brute-Force-Suche ist absolut gesehen zwar nicht langsam, braucht beispielsweise für 60000 Alphanoteinträge in Matlab aber dennoch 140 ms. Insbesondere

falls ein höherdimensionaler und/oder feiner abgetasteter Parameterraum eingesetzt werden soll, kann es passieren, dass die vollständige Suche zu langsam wird, obwohl es sich um eine relativ effizient durchführbare Differenzbildung handelt.

Der Gradientenabstieg erfolgt über einen Indexvektor $\mathbf{u} = (u_h, u_w, u_p)$ im Parameterraum der vorberechneten Sonarantworten:

$$\mathcal{N}_6(\mathbf{u}) := \{(u_h \pm 1, u_w, u_p), (u_h, u_w \pm 1, u_p), (u_h, u_w, u_p \pm 1)\}. \quad (9.52)$$

Dabei wird das Fehlermaß für jeden Indexvektor in \mathcal{N}_6 ausgewertet

$$E(\mathbf{m}^{-F}, \mathbf{a}(\mathbf{p}(\mathbf{u}))), \quad (9.53)$$

und ausgehend vom Index mit geringstem Fehler erneut die Nachbarschaft $\mathcal{N}_6(\mathbf{u})$ evaluiert.

Leider besitzt das Fehlervolumen viele Plateaus und viele lokale Minima, so dass das globale Minimum nicht durch zufällige Initialisierung der Startwerte gefunden wird. Insbesondere um den korrekten Positionsparameter bilden sich lokale Maxima aus, die für einen erfolgreichen Gradientenabstieg erfordern, dass sehr nahe beim korrekten Wert begonnen wird.

Durch die Verwendung der lokal begrenzten Wu/Wendland-Kernel aus der 1D-Sonarsimulation zeigte sich, dass große Bereiche im Fehlerraum einen Gradienten identisch null besitzen. Dies ist eine direkte Folge des lokalen Supports der Kernelfunktionen. Bei der Suche des Optimums per Gradientenabstieg ist diese Lokalität gerade von Nachteil, weswegen in dieser Arbeit schlussendlich die gaußförmigen Kernels eingesetzt wurden.

Die Fehlerflächen sind bei den Auswertungen im Abschnitt 10.2.2.1 abgebildet.

9.4.3.13 Gradientenabstieg in der Nachbarschaft eines Alphabeteintrags

Üblicherweise wird derjenige Alphabetkernel $\mathbf{a}(h_o, w_o, p_o)$, der die Sonarantwort am besten beschreibt, einen Parametervektor besitzen, der nicht im Alphabet enthalten ist, sondern irgendwo zwischen den Abtastpunkten im Parameterraum liegen. Für die Bestimmung dieses Parametervektors erlaubt es die vorangegangene Suche über die Alphabeteinträge einen Startpunkt zu wählen, der näher am Optimum liegt als ein zufällig gewählter Punkt. Da

die Sonarantworten für Parameter zwischen den Abtastpunkten nicht vorberechnet wurden, wird eine Nachbarschaftssuche gestartet, die ausgehend vom bestpassenden Alphabeteintrag $\mathbf{a}(h_\alpha, w_\alpha, p_\alpha)$ einen Gradientenabstieg auf der Fehlerfläche außerhalb der Alphabeteinträge durchführt.

Dies geschieht wie folgt: Eine 6-Nachbarschaft \mathcal{N}'_6 um $(h_\alpha, w_\alpha, p_\alpha)$ wird iterativ mit einem Schrittweitenvektor $(\Delta h, \Delta w, \Delta p)$ evaluiert, wobei die Schrittweite deutlich kleiner sein soll als der Abstand zwischen vorberechneten Alphabeteinträgen. Es werden Kandidatenterrains mit den folgenden Kandidaten durch Raytracing berechnet:

$$\mathcal{N}'_6 := \{k(h_\alpha \pm \Delta h, w_\alpha, p_\alpha), k(h_\alpha, w_\alpha \pm \Delta w, p_\alpha), k(h_\alpha, w_\alpha, p_\alpha \pm \Delta p)\}. \quad (9.54)$$

Wenn eine bessere Übereinstimmung gefunden wurde, setzt die Nachbarschaftssuche mit dem besseren Parametervektor fort, bis entweder keine Verbesserung mehr erzielt wird oder die Maximalzahl an Iterationen erreicht wurde.

Die Wahl der Schrittgröße des Gradientenabstiegs hängt hauptsächlich von den vorab gewählten Abständen der Alphabeteinträge ab. Natürlich können auch adaptiv angepasste Schrittgrößen wie in anderen Gradientenabstiegsverfahren verwendet werden.

Für jeden Schritt auf dem Weg von $(h_\alpha, w_\alpha, p_\alpha)$ nach (h_o, w_o, p_o) muss also die vergleichsweise rechenintensive Raytracing-gestützte Simulation der Sonarantwort verwendet werden. Die vorangehende Suche über die Alphabeteinträge sorgt aber dafür, dass die Suche in der Nähe des globalen Optimums startet, vorausgesetzt, das Alphabet ist fein genug aufgelöst. Da die Rechenzeit für die Raytracing-gestützte Simulation unabhängig davon ist, wieviele Kernels in der Szene platziert werden, können an dieser Stelle alle bis zu dem Zeitpunkt gefundenen Kernels mit einbezogen werden und eine Sonarantwort berechnet werden, die die ansonsten vernachlässigten Nichtlinearitäten (siehe Abschnitt 9.4.3.4) enthält. Der jeweils nächste Parametervektor \mathbf{p}' im Gradientenabstieg ergibt sich also wie folgt:

$$\mathbf{p}' = \arg \min_{\mathbf{p} \in \mathcal{N}'_6} E \left(S \left(z_F + k(\mathbf{p}) + \sum_{k \in \mathcal{K}} k_k(h, w, p) \right) - \mathbf{m} \right). \quad (9.55)$$

Durch diesen Gradientenabstieg wurde im Vergleich zum extrem gestiegenen Rechenaufwand keine nennenswerte Verbesserung erzielt. Dies liegt vermutlich daran, dass schon von der Modellierung her Fehler in Kauf genommen werden, und die erzielbare Genauigkeit bereits durch die Alphabeteinträge abgedeckt wurde.

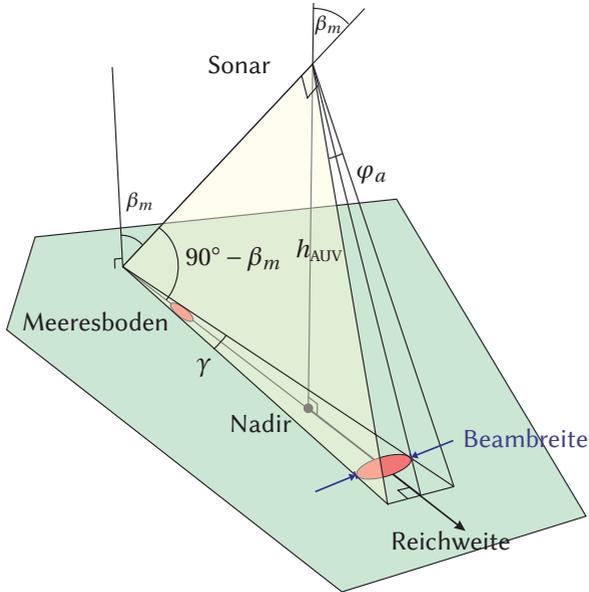


Abbildung 9.20: Strahlaufweitung des Sidescan-Sonars.

9.4.3.14 2,5D-Verfahren

Um eine für die Fahrzeugnavigation geeignete globale Darstellung zu bekommen, werden die 1D-Schätzungen der einzelnen Sonarmessungen nun gemäß der Fahrzeugposition auf einer globalen Karte positioniert und unter Berücksichtigung der variierenden Auflösung des Sidescan-Sonars (siehe Abschnitt 6.3.3.3) zu 2D-Kernen erweitert. Im Folgenden sei die Eigenbewegung und damit die Positionen der Messungen perfekt bekannt. Die globale »Blickrichtung« des Sonars projiziert in Bodenkoordinaten wird mit ν bezeichnet. Die lokale x -Koordinate im jeweiligen Fahrzeugkoordinatensystem der Messung ist mit x_L gekennzeichnet. Der Winkel φ_a bezeichnet

den Öffnungswinkel des Sonarstrahls, β_m bezeichnet den Montagewinkel des Sonars zur Hochachse und γ bezeichnet den virtuellen Öffnungswinkel in Bodenkoordinaten. Die daraus resultierende Unsicherheit in along-track-Richtung wird durch U_γ dargestellt. Diese Winkel sind zum besseren Verständnis in Abbildung 9.20 dargestellt und folgendermaßen definiert:

$$\gamma := 2 \cdot \operatorname{atan}\left(\tan\left(\frac{\varphi_a}{2}\right) \cdot \cos\beta\right), \quad (9.56)$$

$$U_\gamma := 2 \cdot (x_L + h_{\text{AUV}} \cdot \tan\beta_m) \cdot \tan\frac{\gamma}{2}. \quad (9.57)$$

Die Position p in lokalen Koordinaten wird gemäß der Orientierung des Fahrzeugs in der Bodenebene an der Position $\mathbf{p} = (p_x, p_y)^T$ eingetragen. Mit der Breite w wird eine Kovarianzmatrix \mathbf{C} erzeugt, die senkrecht dazu die Unsicherheit der Strahlaufweitung beinhaltet. Die Höhe des Kerns bleibt unverändert erhalten. Nach diesem Vorgehen lässt sich aus den Parametern (h, w, p) des 1D-Kerns ein 2D-Kern bilden:

$$k(h, \mathbf{C}, \mathbf{p}) = h \cdot \exp\left(-\frac{1}{2}(\mathbf{x} - \mathbf{p})^T \mathbf{C}(\mathbf{x} - \mathbf{p})\right) \quad (9.58)$$

wobei $\mathbf{C} = \mathbf{V} \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{V}^T$ gilt, (9.59)

mit $\mathbf{V} = \begin{pmatrix} \mathbf{v}(0) & -\mathbf{v}(1) \\ \mathbf{v}(1) & \mathbf{v}(0) \end{pmatrix}$, (9.60)

und $\mathbf{D} = \begin{pmatrix} w^2 & 0 \\ 0 & w^2 U_\gamma \end{pmatrix}$. (9.61)

9.4.3.15 Alphabeterzeugung für die 2,5D-Erweiterung

Beim Übergang zu den 2D-Kernen wurde im Rahmen der Erweiterung auf die 2,5D-Karte auch das Raytracing für die Alphabeterzeugung im Gegensatz zum 1D-Verfahren mit der Simulationsumgebung WOSIM (Abschnitt 8.3) in vollen drei Dimensionen durchgeführt. Die Kernelterrains für die Alphabeterzeugung haben in Across-Track-Richtung das identische Profil wie im 1D-Fall. In Along-Track-Richtung sind sie bis zum Terrainende ausge dehnt, wie es in Abbildung 9.21 dargestellt ist. So ist sichergestellt, dass die gesamte Antennencharakteristik auf den Kernel trifft. Die Kernelprofile wurden absichtlich nicht im identischen radialen Abstand um den Sensor

herum angeordnet, damit die 3D-Antennencharakteristik einen Einfluss auf die Alphabeteinträge behält.

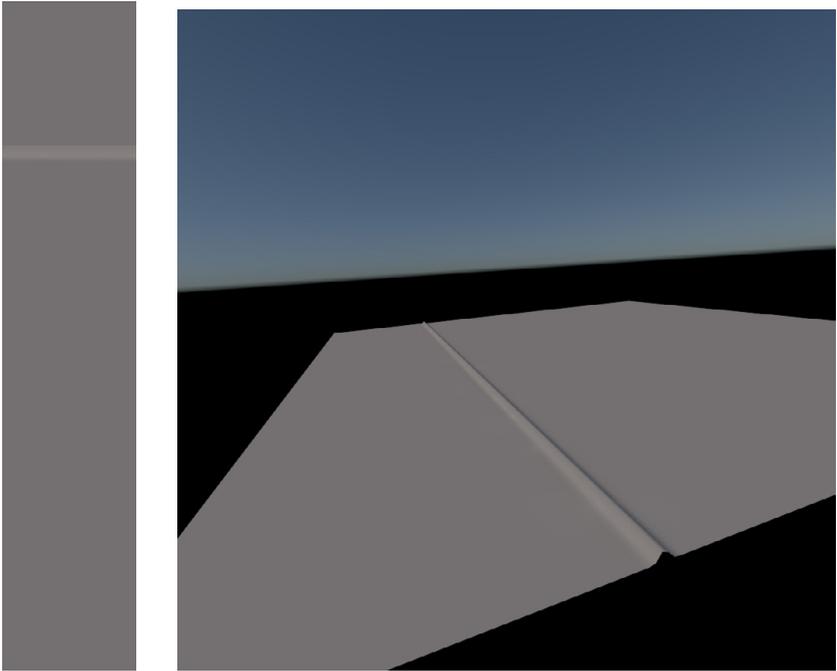


Abbildung 9.21: Szene zur Alphabeteintragsproduktion für die 2,5D Rekonstruktion optisch gerendert aus Sicht des Sonarsensors (links) und schräg von der Seite (rechts). In der Sonarsicht erkennt man im optischen Rendering lediglich ein helleres Band durch die stärkere Reflexion am steilen Anstieg des Kernels. Im Schrägsicht-Bild ist im Hintergrund noch ein künstlicher Horizont zu sehen, der lediglich der Orientierung dient. Die Szene zeigt den Eintrag zu Kernel $k(1.5, 0.5, 50.1925)$.

9.4.3.16 Fusion der Linienrekonstruktionen

Um eine 2,5D-Höhenkarte zu erhalten, wird anschließend entschieden, ob es sich um ein neues Merkmal handelt oder eine Fusion der neu hinzukommenden Einzelschätzung mit den bisher gefundenen Kerneln angebracht ist [Woo15a]. Für die Fusion stehen Abstandsmaße basierend auf der Bhattacharyya-Distanz, der Salmond-Distanz und der Kullback-Leibler-Divergenz zur Auswahl.

Die Fusion der Einzelkernels ist letztlich ein Datenassoziationsproblem, das in der Literatur ausführlich diskutiert wird, z. B. bei Neira et al. [Nei01]. Eine vollständige Optimierung über die Datenassoziation, welche Kernels dasselbe Merkmal darstellen, würde bedeuten zu ignorieren, dass durch die Nichtbeachtung der Nichtlinearität ohnehin bereits ein Kompromiss eingegangen wurde. Aufgrund der Kernelgewichtung, wie in sie in Abschnitt 9.4.3.9 dargestellt ist, werden nahe beieinanderliegende Kernels ja bereits benachteiligt.

Darüber hinaus befindet man sich bei der Fusion der Ergebnisse bereits auf dem Gebiet der Kartenerstellung. Sobald die Genauigkeit der Eigenbewegung nicht mehr als perfekt bekannt angenommen wird und auch mitgeschätzt wird, beschreibt man ein SLAM-Problem. Hier wird jedoch von perfekt bekannter Eigenbewegung ausgegangen.

Die untersuchten Ähnlichkeitsmaße werden im Folgenden dargelegt: Die Bhattacharyya-Distanz zwischen Verteilungen $P_k(\boldsymbol{\mu}_k, \mathbf{C}_k)$ ist folgendermaßen definiert:

$$D_B(P_1, P_2) := \frac{1}{2} \log \frac{|\frac{1}{2}\mathbf{C}_1 + \frac{1}{2}\mathbf{C}_2|}{\sqrt{|\mathbf{C}_1| \cdot |\mathbf{C}_2|}} + \frac{1}{8} \Delta \boldsymbol{\mu}^T \left(\frac{1}{2}\mathbf{C}_1 + \frac{1}{2}\mathbf{C}_2 \right) \Delta \boldsymbol{\mu}, \quad (9.62)$$

$$\text{mit } \Delta \boldsymbol{\mu} := (\boldsymbol{\mu}_1 - \boldsymbol{\mu}_2). \quad (9.63)$$

Die quadrierte Salmond-Distanz ist für nichtnegative Gewichte w_j , die sich zu 1 addieren, wie folgt definiert:

$$\boldsymbol{\mu}_M := w_1 \boldsymbol{\mu}_1 + w_2 \boldsymbol{\mu}_2, \quad (9.64)$$

$$\mathbf{W} := w_1 \mathbf{C}_1 + w_2 \mathbf{C}_2, \quad (9.65)$$

$$\mathbf{B} := w_1 (\boldsymbol{\mu}_1 - \boldsymbol{\mu}_M) (\boldsymbol{\mu}_1 - \boldsymbol{\mu}_M)^T + w_2 (\boldsymbol{\mu}_2 - \boldsymbol{\mu}_M) (\boldsymbol{\mu}_2 - \boldsymbol{\mu}_M)^T, \quad (9.66)$$

$$\mathbf{C}_M := \mathbf{W} + \mathbf{B}, \quad (9.67)$$

$$\Delta \mathbf{W}_{12} := \frac{w_1 w_2}{w_1 - w_2} (\boldsymbol{\mu}_1 - \boldsymbol{\mu}_2) (\boldsymbol{\mu}_1 - \boldsymbol{\mu}_2)^T \quad (9.68)$$

$$D_S^2(P_1, P_2) := \text{tr}(\mathbf{C}_M^{-1} \Delta \mathbf{W}_{12}). \quad (9.69)$$

Im vorgestellten Verfahren werden die Gewichte der zwei Kernel vor der Fusion normiert und folgendermaßen definiert:

$$\bar{w}_i = \frac{w_i}{w_i + w_j} \quad \text{und} \quad \bar{w}_j = \frac{w_j}{w_i + w_j}. \quad (9.70)$$

Die Kernels werden aufgeteilt in die Menge der Kernels mit positiver Höhe (Erhebungen) und der mit negativer Höhe (Löcher) und nur innerhalb dieser Mengen werden Kernels fusioniert. Nur so ergibt die Fusion zwischen zwei Kernels nach den Verfahren aus Runnalls [Run07] Sinn, die ja für Gaußmischverteilungen entworfen sind. Das Fusionskriterium nach Runnalls [Run07] $D_R((w_i, \boldsymbol{\mu}_i, \mathbf{C}_i), (w_j, \boldsymbol{\mu}_j, \mathbf{C}_j))$ basiert auf der Kullback-Leibler-Divergenz und vergleicht zwei Elemente einer Gaußmischung. Durch eine vorausgehende gemeinsame Diagonalisierung der Kovarianzmatrizen wird eine unitäre Matrix \mathbf{U}_{ij} gewonnen, die beide Kovarianzmatrizen zu einer Diagonalmatrix \mathbf{D} diagonalisiert:

$$\mathbf{C}_i = \mathbf{U}_{ij}^{-1} \mathbf{D}_i \mathbf{U}_{ij}^{-\text{T}}, \quad (9.71)$$

$$\mathbf{C}_j = \mathbf{U}_{ij}^{-1} \mathbf{D}_j \mathbf{U}_{ij}^{-\text{T}}, \quad (9.72)$$

womit folgender Vektor definiert wird:

$$\mathbf{u}_{ij} = \mathbf{U}_{ij}(\boldsymbol{\mu}_i - \boldsymbol{\mu}_j). \quad (9.73)$$

Die Runnalls-Distanz lautet dann:

$$\begin{aligned} D_R(i, j) = \frac{w_1 + w_2}{2} \cdot \left(\log \det \left(\bar{w}_i (\mathbf{D}_i \mathbf{D}_j^{-1})^{\bar{w}_j} \right. \right. \\ \left. \left. + \bar{w}_j (\mathbf{D}_j \mathbf{D}_i^{-1})^{\bar{w}_i} \right. \right. \\ \left. \left. + \bar{w}_i \bar{w}_j \mathbf{D}_i^{-\bar{w}_i} \mathbf{D}_j^{-\bar{w}_j} \mathbf{u}_{ij} \mathbf{u}_{ij}^{\text{T}} \right) \right). \end{aligned} \quad (9.74)$$

Dabei bezeichnet \mathbf{D}^α die Diagonalmatrix, bei der elementweise mit α potenziert wurde.

Fällt der Abstand zwischen zwei Kernels unter einen für jedes Verfahren empirisch ermittelten Schwellwert, werden die Kernels fusioniert. Mit einem Wert von 0,4–0,5 für die Runnalls-Distanz wurde eine gute Balance zwischen neu platzierten Kernels und fusionierten Kernels erzielt. Zwei Kernels werden fusioniert, indem sie durch ihre momentenerhaltende Mischverteilung (engl. *moment-preserving merge*, *MPM*) $\text{sgn}(h_l) \cdot P_m(\boldsymbol{\mu}_m, \mathbf{C}_m)$ ersetzt werden:

$$\boldsymbol{\mu}_m := \bar{w}_1 \boldsymbol{\mu}_1 + \bar{w}_2 \boldsymbol{\mu}_2, \quad (9.75)$$

$$\mathbf{C}_m := \bar{w}_1 \mathbf{C}_1 + \bar{w}_2 \mathbf{C}_2 + \bar{w}_1 \bar{w}_2 (\boldsymbol{\mu}_1 - \boldsymbol{\mu}_2)(\boldsymbol{\mu}_1 - \boldsymbol{\mu}_2)^{\text{T}}. \quad (9.76)$$

Mit der Bhattacharyya-Distanz wurden keine konsistenten Schätzergebnisse erzielt. Der Hauptgrund ist, dass die Höhe der Kernels keinen Eingang in die Distanzberechnung findet. Die Fusion mit der Salmond-Distanz erzielte ähnliche Ergebnisse wie die Runnalls-Distanz.

9.4.4 Rekonstruktion mittels Markov Random Field und Belief Propagation

9.4.4.1 Einführung

Das Kernelverfahren aus Abschnitt 9.4.3 bringt eine dramatische Reduktion der Parameter zur Beschreibung der Oberfläche mit sich. Um die Einschränkung eines ebenen Meeresbodens zu verlieren, wird nun ein Schätzverfahren vorgestellt, das ein vollständiges Rekonstruktionsvolumen betrachtet, durch das sich der Schall bewegt. In diesem Verfahren wird ein Bayes'scher Ansatz vorgeschlagen, um die 3D-Gestalt des Meeresbodens aus mehreren Sonarmessungen zu rekonstruieren. Das vorgestellte Verfahren gründet auf aktuellen Methoden im Bereich des inversen Raytracings aus dem Bereich Maschinensehen [Liu10; Liu11; Liu14]. Diese Methoden werden an die Sonardomäne angepasst, was durch die zweidimensionale Strahlgeometrie veränderte Strategien zum Nachrichtenaustausch zur Inferenz erforderlich macht.

Die Problemstellung lässt sich im Bayes'schen Kontext folgendermaßen formulieren: Eine Oberfläche Z , wird durch eine Menge an Sidescan-Sonarmessungen \mathcal{B} gemessen. Dies lässt sich mit der Bayes-Regel folgendermaßen ausdrücken:

$$P(Z|\mathcal{B}) = \frac{P(\mathcal{B}|Z) \cdot P(Z)}{P(\mathcal{B})}. \quad (9.77)$$

Gesucht ist die wahrscheinlichste Oberfläche, gegeben alle Messungen:

$$\operatorname{argmax}_Z \underbrace{P(Z|\mathcal{B})}_{\text{posteriore WK}} = \operatorname{argmax}_Z \left(\underbrace{P(\mathcal{B}|Z)}_{\text{Vorwärtsmodell}} \cdot \underbrace{P(Z)}_{\text{a-priori-Wissen}} \right). \quad (9.78)$$

9.4.4.2 Faktorgraphen

Zur Lösung des Problems wird eine probabilistische Inferenz auf Faktorgraphen durchgeführt. Diese Graphen werden nun kurz eingeführt, für eine umfangreiche Beschreibung graphischer Modelle und Inferenzmethoden

sei auf die Bücher von Koller et al. [Kol09] und Murphy [Mur12] verwiesen. Eine sehr illustrative Einführung in Faktorgraphen und Nachrichtenaustauschgorithmen gibt Loeliger [Loe04].

Faktorgraphen sind eine vereinheitlichte Darstellung für ungerichtete und gerichtete Graphen, die eine Vereinfachung für einige Nachrichtenaustauschgorithmen darstellt [Mur12]. Ein Faktorgraph zu einem MRF ist ein ungerichteter, bipartiter Graph mit zweierlei Arten von Knoten: Faktorknoten und Variablenknoten. Die Variablenknoten werden in der Darstellung üblicherweise mit Kreisen, Faktoren mit Quadraten wiedergegeben. Die Beziehungen zwischen Variablen werden durch die Faktoren beschrieben, indem für jede maximale Clique des MRF-Graphen ein Faktor gebildet wird, der mit allen Variablen der Clique verbunden ist.

Die Verbundwahrscheinlichkeit für die Variablen kann dann durch das Hammersley-Clifford-Theorem proportional zum Produkt der Cliquespotentiale im Graph definiert werden [Mur12].

Setzt man Wahrscheinlichkeiten auf Basis von Energien mit $p(\cdot) = e^{-\mathcal{E}}$ an, so dass die Energiedomäne als logarithmisch-probabilistische Domäne interpretiert wird, gewinnt man eine additive Formulierung [Mur12]. Damit lässt sich das Problem so schreiben:

$$\mathcal{E}_{\text{prior}}(Z) = \log(P(Z)) , \quad (9.79)$$

$$\mathcal{E}_{\text{likelihood}}(\mathcal{B}, Z) = \log(P(\mathcal{B}|Z)) , \quad (9.80)$$

$$\mathcal{E}_{\text{posterior}}(Z, \mathcal{B}) = \log(P(Z|\mathcal{B})) , \quad (9.81)$$

$$Z^* = \underset{Z}{\operatorname{argmin}} \mathcal{E}_{\text{posterior}}(Z, \mathcal{B}) =$$

$$\underset{Z}{\operatorname{argmin}} (\mathcal{E}_{\text{prior}}(Z) + \mathcal{E}_{\text{likelihood}}(\mathcal{B}, Z)) . \quad (9.82)$$

Einfacher Beispielgraph

Im zu lösenden Rekonstruktionsproblem soll die wahrscheinlichste Belegung O_{opt} von Voxeln gefunden werden, die zu den Messungen aus \mathcal{B} korrespondiert. Ein Markov Random Field (MRF) zu einem Beispiel-Voxelvolumen aus nur 3 Voxeln beinhaltet 3 Variablenknoten der Belegtheitsvariablen v_1, v_2, v_3 . Die Graphenstruktur auf dem MRF für diese Variablen ergibt sich wie folgt: Jede Variable unterliegt unitären Bedingungen, paarweisen Bedingungen und Bedingungen von der Messung her. Entsprechend werden die Variablen in einem Graph verbunden. Daraus kann man einen Cliquengraph erzeugen,

in dem jede Clique des Graphen in einem Knoten wiedergegeben ist (siehe Abbildung 9.22). Dieser Cliquengraph lässt sich auch als Faktorgraph darstellen, in dem die Cliques die Faktoren sind (siehe Abbildung 9.23): Jede Voxelvariable ist im Graph mit einem Einzelknotenfaktor verbunden, der a-priori-Wissen über die Belegung codiert. Die benachbarten Voxel v_1, v_2 sowie v_2, v_3 sind durch Paarknotenfaktoren verbunden, die z.B. a-priori-Wissen über Glattheitseigenschaften codieren. Zusätzlich sind alle Variablen, die von einer Messung betroffen sind, über einen Faktor verbunden, im Beispielfall alle drei Voxel.

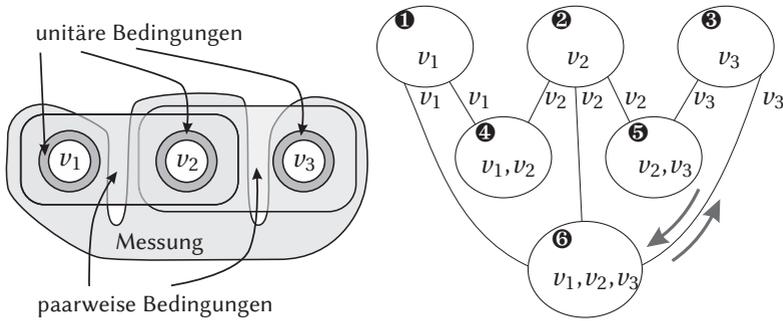


Abbildung 9.22: Illustration zum Beispiel in Gleichung (9.83). Links die Einflüsse auf die Variablen und rechts der resultierende Cliquengraph.

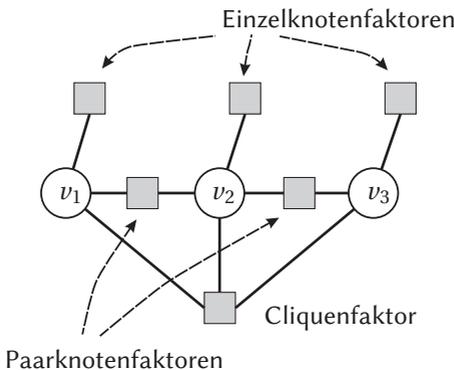


Abbildung 9.23: Mit dem Beispiel assoziierter Faktorgraph.

Durch den gebildeten Faktorgraphen kann man die Verbundverteilung einer gleichzeitigen Zuweisung aller Belegungsvariablen im MRF beschreiben. Die entsprechenden Bedingungen zu den Faktortypen sind in Gleichung (9.83) dargestellt, mit dem sich die Verbundverteilung $P(\mathbf{W}) = P(v_1, v_2, v_3)$ darstellen lässt:

$$\underbrace{f(v_1) \cdot f(v_2) \cdot f(v_3)}_{\text{unitäre Bedingungen}} \cdot \underbrace{f(v_1, v_2) \cdot f(v_2, v_3)}_{\text{paarweise Bedingungen}} \cdot \underbrace{f(v_1, v_2, v_3)}_{\text{Cliques-Bed.}} \sim P(\mathbf{W}), \quad (9.83)$$

wobei f hier das jeweilige Cliquespotential darstellt.

Durch diese Struktur auf den Variablen wird eine große Wahrscheinlichkeitsfunktion durch ein langes Produkt von Wahrscheinlichkeitsfunktionen geschrieben, die jeweils nur von wenigen Variablen abhängen, was effiziente Inferenzmethoden ermöglicht.

9.4.4.3 RayMRF-Modell von Liu et al.

Im sogenannten »RayMRF«-Modell nach Liu und Cooper [Liu10] wird im zu rekonstruierenden Volumen ein Voxelgitter aufgespannt, wobei jedes Voxel mit einer binären Zufallsvariable korrespondiert, die die Belegung ausdrückt. Jede Zuweisung von Belegungen kodiert die gesamte räumliche Verteilung reflektierenden Materials und erlaubt dabei schwebende Materie wie z. B. ein Fisch oder auch Hohlräume unterhalb der Oberfläche. Ein globales Multi-Energiepotential beschreibt, wie gut die geschätzte Oberfläche mit den gemessenen Sonardaten und den a priori Annahmen übereinstimmt.

Die Beziehungen zwischen Voxeln werden wie im Beispiel durch Faktoren beschrieben, die mit den Variablen verbunden sind. Das zugrundeliegende Markov Random Field (MRF) beschreibt im Wesentlichen die Verbundverteilung einer gleichzeitigen Zuweisung aller Belegungsvariablen.

Das RayMRF-Modell enthält ebenfalls die genannten drei Arten von Faktoren: Zuerst die Einzelknotenfaktoren oder »unitäre Faktoren«, die nur mit einer einzigen Variable verbunden sind und die die a priori Belegungswahrscheinlichkeit der zugehörigen Variablen angeben. Da nicht alle möglichen Belegungskonfigurationen für die Oberflächenform zugelassen werden sollen, könnte man durch die unitären Faktoren beispielsweise fordern, dass Höhenwerte um einen vorher bekannten Höhenwert z_0 , oder allgemeiner, um ein vorab bekanntes grob aufgelöstes Profil normalverteilt sind. Die

Einzelknotenfaktorenergie entspricht also gewissermaßen den Kosten, einem Voxel eine bestimmte Belegung zuzuweisen.

Die Paarknotenfaktoren oder »paarweise Faktoren« verbinden benachbarte Voxel und repräsentieren beispielsweise Stetigkeit oder gewisse Glattheitseigenschaften. Das sind übliche Anforderungen, die an eine natürliche Oberfläche gestellt werden. Analog zur Einzelknotenfaktorenergie beschreibt die Energie des Paarknotenfaktors die Kosten, die entstehen, wenn eine bestimmte Zuweisung an die beiden benachbarten Knoten erfolgt.

Diese Faktoren werden in der logarithmisch-probabilistischen Schreibweise im Folgenden mit \mathfrak{E}_u respektive \mathfrak{E}_p bezeichnet. Diese beiden Faktorklassen finden sich auch in klassischen MRF-Modellen der 2D-Bildverarbeitung, wie dem ursprünglich aus der Physik stammenden Ising-Modell [Bla11; Mur12] oder im Sonarrekonstruktionverfahren von Hayes [Hay08].

Die dritte Klasse von Faktoren, die ausschlaggebenden sog. Strahlfaktoren (bei Liu et al. : *ray factors*), verbinden diejenigen Voxel, die bei der Datenaufnahme gemeinsam für ein Messdatum verantwortlich sind, bzw. sein können. Im Falle der Kameraaufnahme von Liu et al. sind das alle Voxel im Rekonstruktionsvolumen, die von einem Sichtstrahl getroffen werden, der von einem Pixel durch das optische Zentrum geht. Diese Strahlfaktoren beschreiben die Übereinstimmung zwischen einem beobachteten Messwert und der Belegungszuweisung des Voxelgitters.

Ein zweckmäßiges Verfahren, um in einem MRF die maximum-a-posteriori (MAP) Belegung (hier entsprechend einer Meeresbodenoberfläche) zu finden, ist als *loopy belief propagation* (LBP) bekannt. Murphy [Mur12] gibt eine gute Abhandlung über die Eigenschaften des Verfahrens. Es wird mit seinen Eigenschaften hier kurz vorgestellt.

LBP ist ein approximativer Inferenzalgorithmus für Graphen. Der zugrundeliegende Belief-Propagation-Algorithmus (BP) ist eine auf Nachrichtenaustausch basierende Implementierung, um Marginalverteilungen oder Maximalverteilungen auf baumartig strukturierten probabilistischen Modellen zu berechnen. Nachrichtenaustauschalgorithmen können als parallele Implementierung von dynamischem Programmieren aufgefasst werden. Es bestehen enge Verknüpfungen zum Viterbi-Algorithmus, dem Forward-Backward-Algorithmus bei HMMs und dem Kalman-Smoothing [Loe04]. Die Grundidee ist, dass sich alle Nachbarknoten gleichzeitig austauschen und dann ihre eigenen Beliefs anpassen. Im Anschluss senden sie neue

Nachrichten an die Nachbarknoten. Auf Bäumen berechnet BP die optimale Zustandsbelegung, für Graphen mit Schleifen heißt das Verfahren LBP und konvergiert nicht notwendigerweise, hat sich in der Praxis aber bewährt [Mur12]. Die Fälle, in denen keine Konvergenz auftritt, würden im Beispiel der Sonardaten bedeuten, dass Messungen sich derart widersprechen, dass die gefundenen Belegungen während des Nachrichtenaustauschs hin und her oszillieren und nicht zu einer Belegung konvergieren [Kol09]. Manche Varianten von LBP führen das Austauschen der Nachrichten nicht synchron durch, sondern benutzen neue Nachrichten, wenn sie vorliegen und ansonsten die alten Nachrichten. Das zeigt laut Murphy [Mur12] zusammen mit Dämpfung (Nachrichten mit der Zeit abschwächen, um Oszillation zu verhindern) häufig ein besseres Verhalten als synchrone Updates, wird im vorgestellten Verfahren aber nicht gemacht. Murphy führt weiter aus, dass, wenn LBP im Gauß'schen Falle konvergiert, die Mittelwerte korrekt sind, die Varianzen jedoch nicht. Außerdem werden die Beliefs normalerweise übermäßig selbstsicher (engl. *confident*) berechnet. Da LBP im allgemeinen Fall keinerlei Garantien bezüglich Genauigkeit oder Laufzeit macht, kann es auch als Heuristik anstatt als Approximationsalgorithmus gesehen werden.

9.4.4.4 Überlegungen zur Inferenz

Um eine Nachricht von einem Faktor zu berechnen, muss man alle möglichen Zuweisungen der verbundenen Variablen betrachten und damit ein lokales Optimierungsproblem lösen. Für die Einzelknotenfaktoren und die Paarknotenfaktoren ist das bei binären Variablen noch leicht zu machen: Bei einem Paarknotenfaktor müssen nur $2^2 = 4$ unterschiedliche Zuweisungen für die Voxelvariablen untersucht werden. In dem vorgeschlagenen Rekonstruktionsverfahren wird der Raum in der Nähe des Bodens als Voxelgitter modelliert und jedem Voxel eine binäre Zufallsvariable zugeordnet, die die Belegtheit (engl. *occupancy*) angibt. Zusammenhänge zwischen Variablen werden wie beschrieben als Faktoren in einem Faktorgraphen beschrieben, die mit den betroffenen Variablen verbunden sind. Da ein Strahlfaktor in der Praxis jedoch durchaus mit Hunderten von Voxeln verbunden sein kann und die Zahl der möglichen Belegungen exponentiell wächst, ist eine naive brute-force Lösung für die Strahlfaktoren nicht möglich.

Die RayMRF-Struktur von Liu zeigt eine neue Methode auf, wie die Strahlfaktor-Nachrichten doch berechnet werden können. Sie nutzt die Tatsache aus, dass die Strahlfaktor-Energie bzw. die Belegungswahrscheinlichkeit nur vom ersten belegten Voxel auf einem Strahl abhängt.

Im Folgenden wird der Ansatz von Liu [Liu11] generalisiert, um ihn auf das deutlich schwierigere Problem der Sonardateninversion anzuwenden: Die Schwierigkeit besteht darin, Nachrichten von aus den Sonarstrahlen gebildeten Faktoren zu berechnen. Im Gegensatz zum inversen Raytracing, bei dem ein Pixelwert die Voxel entlang einer einzelnen Sichtlinie beschränkt, beinhaltet ein Sonarstrahl Voxel in einem relativ breiten Kegel. Die veränderte Geometrie und die damit verbundenen Anpassungen werden im Folgenden dargelegt.

In Woock et al. [Woo14b] wurde für die Sidescan-Problemstellung durch die Anwendung von dynamischem Programmieren und raumfüllenden Hilbertkurven eine praktisch berechenbare Näherungslösung für dieses Problem erstellt, die im Folgenden erläutert wird.

9.4.4.5 Einführung der Beam-Faktoren

Im Gegensatz zu Kameras ist ein Strahl eines Sidescan-Sonars in Azimutrichtung zwar sehr schmal, in Elevationsrichtung hingegen weit ausgedehnt (siehe Abschnitt 6.3.3). Im Folgenden wird nun analog zu RayMRF von Liu ein MRF-basiertes Modell für Sidescan-Sonardaten namens »BeamMRF« formuliert. Die unitären Faktoren und die paarweisen Faktoren werden genauso gehandhabt wie bei Liu, die Beam-Faktoren sehen jedoch anders aus. Jeder Beam ist mit einer noch größeren Zahl an Voxeln verbunden als es ein optischer Sichtstrahl ist. Des Weiteren empfängt das Sonar nicht nur einen einzelnen Farbwert, sondern eine Funktion $I(t)$, die die akustische Energie widerspiegelt, die den Sonarempfänger zum Zeitpunkt t erreicht hat.

Wie bei den anderen Verfahren wird auch hier von isotroper kugelförmiger Schallausbreitung durch konstante Schallgeschwindigkeit ausgegangen. Dadurch werden die Sonarstrahlen kegelförmig. Um den Zusammenhang zwischen der Funktion $I(t)$ und der Bodenform beschreiben zu können, wird auch die Strahlgeometrie diskretisiert. Der Sonarstrahl wird über den Öffnungswinkel in schmale Kegel aufgespalten und jeder Kegel wird in Zeitscheiben aufgeteilt. Dies ist in Abbildung 9.24 dargestellt.

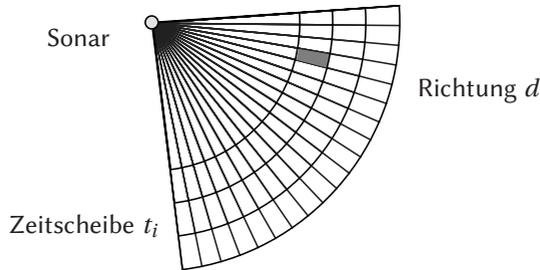


Abbildung 9.24: Diskretisierung des Beams in Richtung und Zeit.

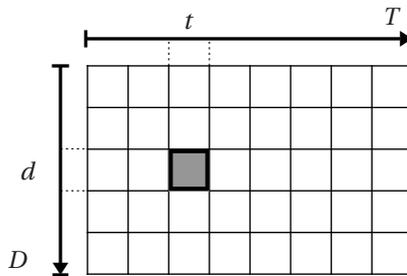


Abbildung 9.25: Logische Darstellung des Beams.

Die vom Sensor aufgenommene Sonarantwort hängt nur von der Oberflächenform des zuerst getroffenen Materials ab. Die aufgenommene Energie $\Delta I(t_i)$ in einer Zeitscheibe t_i stellt also die Summe aller Einzelenergien der Kegel ΔI_s dar, wobei gilt $s \in S(t_i)$ mit $S(t_i)$ entsprechend der Menge an Oberflächenelementen, die für das Signal erreichbar (also nicht abgeschattet) sind und in einem Abstand der Rücklaufzeit der Zeitscheibe t_i von der Sonarquelle liegen. Mehrwegeausbreitung wird an dieser Stelle nicht berücksichtigt.

$$\Delta I(t_i) = \sum_{s \in S(t_i)} \Delta I_s. \quad (9.84)$$

Diese Aufteilung lässt sich in einem logischen zweidimensionalen Gitter mit D Richtungen und T Zeitscheiben darstellen (Abbildung 9.25). Damit kann die Sonarantwort aus der Belegung von $D \cdot T$ Voxeln berechnet werden.

Die Voxel des Beams und die Voxel des Rekonstruktionsvolumens sind aufgrund der geometrischen Anordnung nicht deckungsgleich (Abbildung 9.26).

Sonar

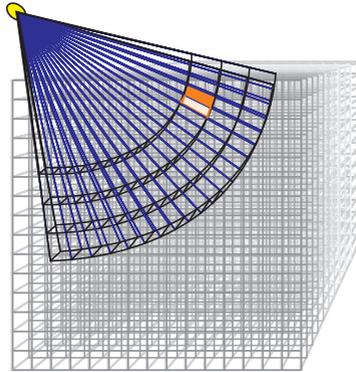


Abbildung 9.26: 3D-Darstellung des Schnitts des Sonarstrahls mit dem Voxelgitter. Durch die konische Form der Voxel muss zwischen den Darstellungen interpoliert werden.

Um die Nachrichten anteilig aufzuspalten und wieder zusammenzusetzen, wird eine Interpolation zwischen den beiden Darstellungen durchgeführt, die hier nicht näher erläutert werden soll. Die Art und Weise der Implementierung der Interpolation ändert das Prinzip des Verfahrens nicht. Der Einfachheit halber wird im Folgenden davon ausgegangen, dass eine Zuweisung zu Variablen in diesem Richtungs-Zeit-Gitter einer Oberflächengeometrie des Meeresbodens entspricht, ohne sich darum zu kümmern, wie diese Interpolation im Hintergrund funktioniert.

Das erste belegte Voxel in Richtung d sei mit $t^*(d)$ bezeichnet. Alle Voxel, die zeitlich vor $t^*(d)$ kommen, also die Voxel mit $t < t^*(d)$ auf dem d -ten Sichtstrahl, sind leer. Die Voxel nach $t^*(d)$ sind entweder leer oder belegt.

Ein Voxel (t, d) reflektiert Energie $I(t, d)$ abhängig von Oberflächennormale, Material und Abstrahlcharakteristik. Dann kann die Energie einer Zeitscheibe (bzw. Tiefenscheibe) folgendermaßen berechnet werden:

$$\Delta I(t) = \sum_{d=1}^D I(t, d) \cdot \delta_{t^*(d)}^t. \tag{9.85}$$

Mit δ ist hier das Kronecker-Delta-Symbol bezeichnet.

Wenn man die Voxelbelegungsvariablen als $o(t,d) \in \{0,1\}$ schreibt, kann $t^*(d)$ wie folgt definiert werden:

$$t^*(d) = \begin{cases} 1, & \text{wenn } o(1,d) = 1 \\ 2, & \text{wenn } o(1,d) = 0 \wedge o(2,d) = 1 \\ 3, & \text{wenn } o(1,d) = 0 \wedge o(2,d) = 0 \wedge o(3,d) = 1 \\ \text{etc.} & \end{cases} \quad (9.86)$$

Ein Datenterm beschreibt die Übereinstimmung zwischen der Vorhersage durch das Vorwärtsmodell ΔI^{est} und der tatsächlichen Messung ΔI^{obs} . Er ist durch das folgende quadratische Funktional der Beam-Energie gegeben. Das Wort Energie bezeichnet hier nicht die Schallenergie, sondern Energie als Wahrscheinlichkeitsrepräsentation (siehe Abschnitt 9.4.4.2).

$$\mathfrak{E}_{B_i} = \sum_{t=1}^T \left(\Delta I^{\text{est}}(t) - \Delta I^{\text{obs}}(t) \right)^2 \cdot w(t). \quad (9.87)$$

Hierbei kennzeichnet $w(t)$ ein zeitabhängiges Gewicht, mit dem man beispielsweise das niedrigere SNR für später eintreffende Samples berücksichtigen kann.

9.4.4.6 Optimierungsziel

Die gesamte MRF-Energie enthält dann die prioren Terme \mathfrak{E}_u und \mathfrak{E}_p , sowie die Summe der Beam-Energien aus einer Menge von Beobachtungen \mathcal{B} . Dabei sind die Einzelknotenenergie \mathfrak{E}_u und die paarweise Energie \mathfrak{E}_p definiert, wie bei Liu [Liu1]. Die zugehörigen Formeln sind im Anhang D zu finden. Diese werden unverändert übernommen und spielen daher für die folgenden Überlegungen keine besondere Rolle.

Das Ziel ist es also, eine Zuordnung O zu finden, die das folgende Gesamtenergie-Funktional minimiert:

$$O_{\text{opt}} = \underset{Z}{\operatorname{argmin}} \left(\underbrace{\mathfrak{E}_u}_{\text{unitäre Bedingungen}} + \underbrace{\mathfrak{E}_p}_{\text{paarweise Bed.}} + \underbrace{\sum_{B_i \in \mathcal{B}} \mathfrak{E}_{B_i}}_{\text{Cliques-Bed.}} \right). \quad (9.88)$$

Dies wird durch Nachrichtenaustausch im Loopy-Belief-Propagation-Verfahren gelöst, der nun näher betrachtet wird.

9.4.4.7 Nachrichtenaustausch (Message passing)

Der Nachrichtenaustausch im LBP erfolgt immer zwischen Variablenknoten und Faktorknoten des bipartiten Graphen, und zwar in beide Richtungen. Im Folgenden wird dargelegt, wie die Nachrichten von einem Beam-Faktor zu den verbundenen Variablen aussieht. Die Aktualisierung der unitären und paarweisen Faktoren werden genau wie im RayMRF-Modell von Liu [Liu11] durchgeführt. In Grafik Abbildung 9.27 ist schematisch dargestellt, wie die aus den Messungen gebildeten Cliques-Faktoren durch Nachrichtenaustausch die Oberflächenform ändern.

Mithilfe des Energiefunktionals \mathfrak{E}_{B_i} (Gleichung (9.87)) werden formal differentielle Nachrichten definiert. Diese enthalten bei binären Zufallsvariablen die gleiche Information wie beide Teilnachrichten. Diese benötigten differentielle Nachrichten $w(t,d)$ vom Faktor f zum Voxel (t,d) und in Gegenrichtung $m(t,d)$ sind definiert als:

$$w(t,d) = M_{f \rightarrow td}(o(t,d) = 1) - M_{f \rightarrow td}(o(t,d) = 0), \quad (9.89)$$

$$m(t,d) = M_{td \rightarrow f}(o(t,d) = 1) - M_{td \rightarrow f}(o(t,d) = 0). \quad (9.90)$$

Dabei sind die Teilnachrichten wie folgt definiert:

$$M_{f \rightarrow td}(o(t,d) = 1) = \min_{\{o(t',d') | o(t,d)=1\}} \left(\underbrace{\mathfrak{E}_{B_i}(\{o(t',d')\})}_{\text{Übereinstimmung}} + \underbrace{\sum_{(t',d') \neq (t,d)} M_{t'd' \rightarrow f}(o(t',d'))}_{\text{eingehende Nachrichten}} \right), \quad (9.91)$$

$$M_{f \rightarrow td}(o(t,d) = 0) = \min_{\{o(t',d') | o(t,d)=0\}} \left(\mathfrak{E}_{B_i}(\{o(t',d')\}) + \sum_{(t',d') \neq (t,d)} M_{t'd' \rightarrow f}(o(t',d')) \right). \quad (9.92)$$

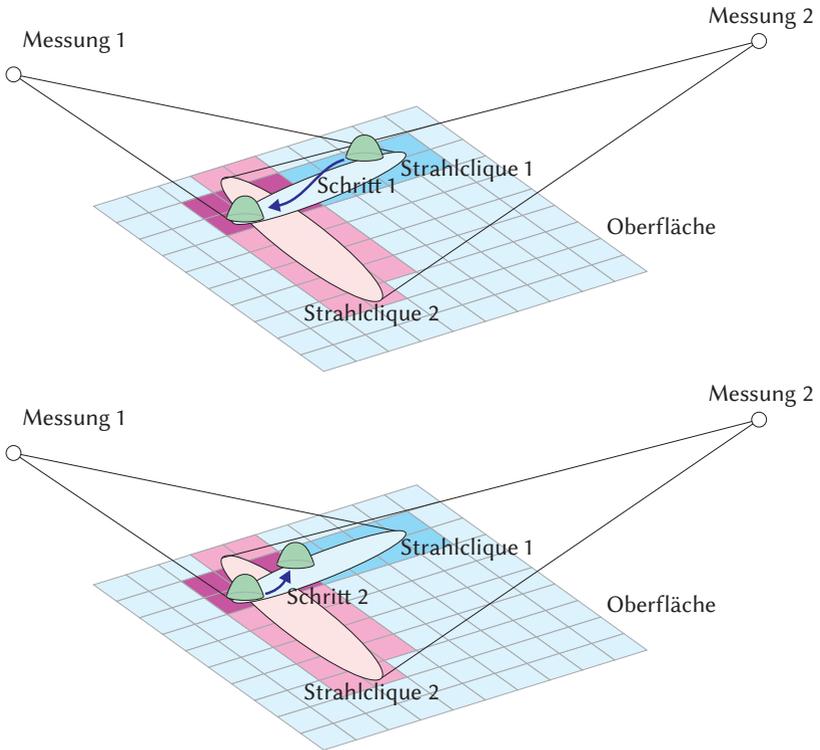


Abbildung 9.27: Stark vereinfachte, schematische Darstellung des Nachrichtenaustauschs. Das Voxelgitter ist der Übersichtlichkeit halber nur in 2D eingezeichnet. Die Oberfläche soll eine besondere Ausprägung haben, die durch das hellgrüne Objekt dargestellt ist. Über die Messungen sind Cliques im Gitter definiert (hellrot und blau). Da die Messungen teilweise die gleichen Voxelvariablen besitzen (lila), tauschen sie über diese Nachrichten aus, bis eine Belegung gefunden ist, die die Oberfläche in Einklang mit allen Messungen bringt und die Ausprägung dorthin platziert, wo sie zu beiden Messwerten passt.

Auf der linken Seite in Gleichung (9.92) stehen die ausgehenden Nachrichten. Auf der rechten Seite ist das Minimum über die Beam-Energie (die Übereinstimmung zwischen Messung und Belegung) und die eingehenden Nachrichten. Um die Notation der Minimumsbildung nicht zu sehr aufzublähen, ist zu beachten, dass die Schreibung dafür steht, das Minimum

über alle Zuweisungen zu allen Voxeln $\{o(t',d')\}$ zu bilden und nicht nur über ein einzelnes $o(t',d')$.

Die Nachrichten von jeder Zufallsvariable zum zugehörigen Faktorknoten sind gleich wie bei üblichen MRFs: Es werden diejenigen Nachrichten aufsummiert und weitergegeben, die die Zufallsvariable von anderen Faktorknoten empfangen hat. Der Fokus liegt jedoch auf den Nachrichten, die von einem Faktorknoten zu den Zufallsvariablen gesendet werden [Liu14].

Direkte Lösung

Die eingehenden Nachrichten $M_{td \leftarrow f}(o(t,d))$ sind also bekannt und das Minimum wird in jedem Fall über alle Zuweisungen zu Variablen außer (t,d) gebildet. Will man das Problem direkt lösen, müssen $\mathcal{O}(2^{D \cdot T})$ Schritte berechnet werden, was für jedes vernünftige D und T zu aufwändig zu berechnen wird, so dass die direkte Lösung unpraktikabel ist.

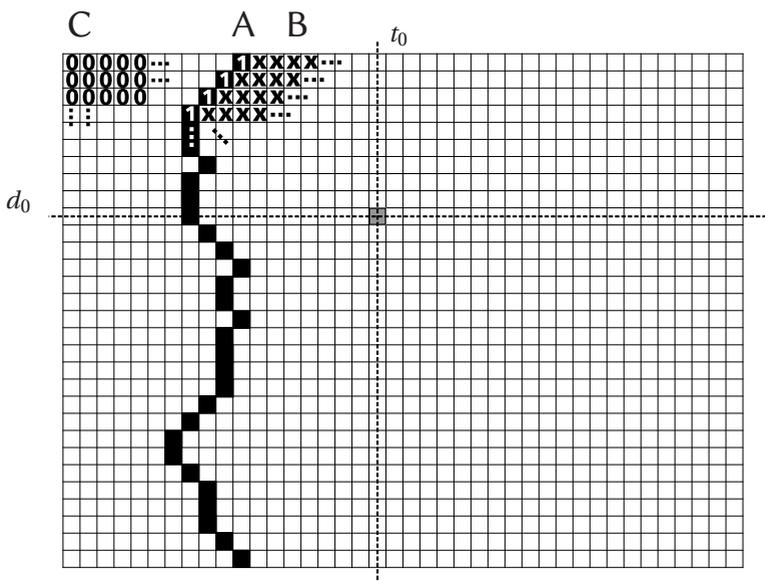


Abbildung 9.28: Einteilung in Regionen.

Exakte frontenbasierte Lösung

Gemäß dem Ansatz in [Liu11] sieht man auch für den Fall des Sonars, dass die Beamenergie nur von $t^*(d)$ abhängt. Es müssen jetzt also nur noch Belegungen des ersten belegten Voxels pro Richtung $t^*(d)$ untersucht werden.

Die Summationen von Gleichung (9.92) können dann in drei Regionen aufgespalten werden, wie sie in Abbildung 9.28 dargestellt sind:

- Region A enthält Voxel $(t^*(d), d)$
- Region B enthält Voxel (t, d) , $t > t^*(d)$
- Region C enthält Voxel (t, d) , $t < t^*(d)$

In Region A sind alle Voxel notwendigerweise belegt und in Region C notwendigerweise unbelegt.

Die Nachrichten können auch berechnet werden, indem man das Minimum über alle Zuweisungen zu

$$\mathbf{a} := (a_1, \dots, a_D) := (t^*(d_1), \dots, t^*(d_D)) \quad (9.93)$$

bildet anstatt über das binäre Gitter. Diese Form macht Termvereinfachungen für jede Region möglich. Belegte Voxel können nur in Region A oder B auftreten (siehe Abbildung 9.28) und man erhält:

$$\begin{aligned} M_{f \rightarrow td}(o(t, d) = 1) = & \min_{\{a | a_d \leq t\}} \left(\mathfrak{E}_{B_i}(\{\mathbf{a}\}) + \underbrace{\sum_{d'=1}^D m(a_{d'}, d')}_{\text{Region A}} \right. \\ & \left. + \underbrace{\sum_{d'=1}^D \sum_{t'=a_{d'+1}}^T \min(0, m(t', d')) - CT_1 - CT_2}_{\text{Region B}} \right) + \xi, \end{aligned} \quad (9.94)$$

$$\text{mit } CT_1 := \begin{cases} \min(0, m(t, d)) & \text{für } t > a_d \\ 0 & \text{sonst,} \end{cases} \quad (9.95)$$

$$\text{und } CT_2 := \begin{cases} m(t, d) & \text{für } t = a_d \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} \quad (9.96)$$

Da ein unbelegtes Voxel (t, d) nur zu den Regionen C oder B gehören kann, gilt:

$$M_{f \rightarrow id}(o(t, d) = 0) = \min_{\{\mathbf{a} | a_d \neq t\}} \left(\mathfrak{E}_{B_i}(\{\mathbf{a}\}) + \sum_{d'=1}^D m(a_{d'}, d') \right. \\ \left. + \sum_{d'=1}^D \sum_{t'=a_{d'+1}}^T \min(0, m(t', d')) - CT_1 \right) + \xi. \quad (9.97)$$

Die Konstante ξ ist nicht wichtig, da sie sich bei der Differenzbildung in der endgültigen Formel für $w(t, d)$ ausgleicht und wegfällt (Gleichung (9.90)). Diese Darstellung ist weiterhin eine exakte Lösung, hat aber nur noch eine Komplexität von $\mathcal{O}(T^D)$. Die Doppelsumme im Minimum würde eigentlich mehr Schritte brauchen, aber die Iteration über $t^*(d)$ kann so umorganisiert werden, dass jede Summe bei jedem Zeitschritt in konstanter Zeit aktualisiert werden kann. Das gleiche gilt für die Beam-Energien in jeder Konfiguration. Weiterhin können Nachrichten, die von einem Faktor zu allen Variablen gehen, in einem Durchgang berechnet werden. Dies wird durch Einsatz dynamischer Programmierung möglich.

Näherungsweise frontenbasierte Lösung

Die Iteration über alle Frontenformen mit der Komplexität von $\mathcal{O}(T^D)$ wird immer noch sehr schnell recht teuer. Wenn man die möglichen Frontverläufe betrachtet, stellt man jedoch fest, dass sehr viele der Formen hochgradig unwahrscheinlich sind und die zugehörigen Fronten nicht zu den meisten Faktornachrichten beitragen. Daher reicht die Untersuchung derjenigen Frontenformen aus, die in der Nähe von »ziemlich wahrscheinlichen« Varianten liegen.

Technisch gesehen ist eine Zuweisung \mathbf{a} zur Frontenform $t^*(d)$ gleichbedeutend mit einer Integer-Zahl, die mit D Ziffern zur Basis T dargestellt wird. Ausgehend von einer Anfangszahl können wir daher einige Werte in der zugehörigen Nachbarschaft betrachten, und zwar in der Weise, dass die Anzahl an Schritten als Parameter für die Suchtiefe vorgegeben wird. Die Zahlen zur Basis T sind für dynamische Programmierung ungeeignet, da sich in jedem Schritt viele Einträge von \mathbf{a} um mehr als eine Einheit verändern können. Daher wird eine Parametrisierung des D -dimensionalen Suchvolumens durch eine raumfüllende Hilbertkurve verwendet [Ski04]. Beim

Entlanggehen dieser Kurve verändert jeder Schritt einen Eintrag a_i nur durch plus oder minus eins. Dies ist in Abbildung 9.29 veranschaulicht. Ein sinnvoller Startwert für die Front kann durch andere Sensorik oder durch andere Verfahren, wie z. B. in Abschnitt 9.4.3 gewonnen werden. Eine effiziente Art, die Nachrichten für einen Beamfaktor zu berechnen, ist wie folgt: Wir wählen eine Startzuweisung für die Front \mathbf{a} und berechnen dann eine Akkumulatorvariable X :

$$X(\mathbf{a}) = \mathfrak{E}_{B_i}(\{\mathbf{a}\}) + \sum_{d'=1}^D m(a_{d'}, d') + \sum_{d'=1}^D \sum_{t'=a_{d'+1}}^T \min(0, m(t', d')) \quad (9.98)$$

Alle Nachrichten werden mit »plus unendlich« initialisiert. Die folgenden Zuweisungen für \mathbf{a} werden gemäß der Hilbertkurven-Parametrisierung ausgewählt. Damit können $X(\mathbf{a})$ und die Nachrichten in jedem Zeitschritt in konstanter Zeit wie folgt aktualisiert werden:

$$M_{f \rightarrow td}(o(t, d) = 0) = \min_{\{\mathbf{a}\}} \begin{cases} X(\mathbf{a}) & \text{wenn } a_d > t \\ \infty & \text{wenn } a_d = t \\ X(\mathbf{a}) - \min(0, m(t, d)) & \text{wenn } a_d < t \end{cases} \quad (9.99)$$

$$M_{f \rightarrow td}(o(t, d) = 1) = \min_{\{\mathbf{a}\}} \begin{cases} \infty & \text{wenn } a_d > t \\ X(\mathbf{a}) - m(t, d) & \text{wenn } a_d = t \\ X(\mathbf{a}) - \min(0, m(t, d)) & \text{wenn } a_d < t \end{cases} \quad (9.100)$$

Für die Implementierung ist es hilfreich, die Minimalwerte für jede Zelle (t, d) zwischenzuspeichern. Die Komplexität der Methode hängt nur noch von der Suchtiefe ab und muss auf Basis der gewünschten Genauigkeit bestimmt werden.

Die restliche Infrastruktur des Rekonstruktionsverfahrens kann direkt aus dem RayMRF-Modell aus [Liu11] übernommen werden.

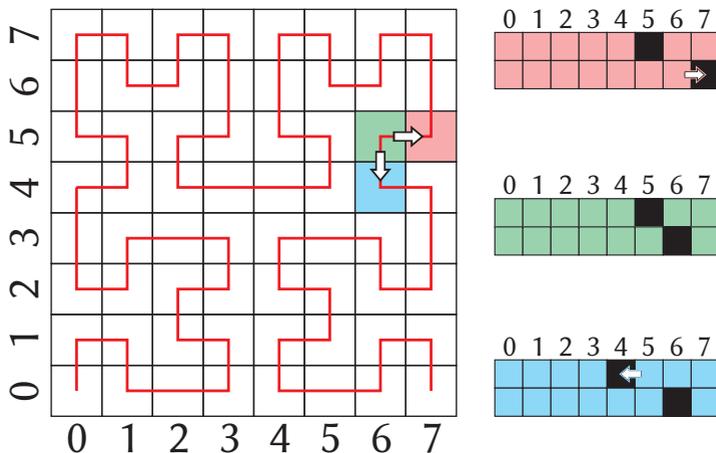


Abbildung 9.29: Parametrierung mit raumfüllender Hilbertkurve für ein Beispiel mit $D = 2$ und $T = 8$. Durch Entlanggehen an der Hilbertkurve wird über Fronten in der Nähe exploriert, da sich nur ein Element ändert.

9.4.5 Salienzmerkmal für Punktwolken

Für die Wiedererkennung von Orten auf Punktwolken wurde im Rahmen der Rekonstruktionsarbeiten in Abschnitt 9.4.2 ein Merkmal entwickelt, das saliente Punkte auf nicht triangulierten Punktwolken findet. Die Annahme ist, dass die Punktwolke eine 2,5D-Höhenkarte repräsentiert und keine vollständigen 3D-Daten. Das Merkmal wird durch ein Voting-Verfahren gewonnen, welches so gestaltet ist, dass es nur lokale Maxima findet, denn diese liegen mit geringerer Wahrscheinlichkeit im Sonarschatten.

Eine Bestimmung der k nächsten Nachbarn ist die einzige Operation, die die Punktwolke für die Bestimmung dieses Merkmals unterstützen muss. Die Punktwolken der PCL bieten die Möglichkeit, die Nachbarn approximativ oder exakt wiederzugeben. Dies erreicht die PCL durch Verwendung der FLANN-Bibliothek²⁹

²⁹ FLANN (Fast Library for Approximate Nearest Neighbor) Open-Source-Bibliothek von Marius Muja und David Lowe. <http://www.cs.ubc.ca/research/flann/> zuletzt abgerufen am 01.10.2015

Die Auswahl von Punkten mit Aussagekraft findet wie folgt statt: Es werden für jeden Punkt die k nächsten Nachbarn gesucht und von diesen erhalten die t Punkte mit der höchsten z -Koordinate eine Stimme (*vote*). Das ist schematisch in Abbildung 9.30 dargestellt. Die Wahl von k sollte abhängig von der Gesamtzahl der Samples in der Punktwolke gemacht werden, denn k kann als Konzentrationsparameter gesehen werden: Wählt man k klein, sind die betrachteten Nachbarschaften auch klein. Damit sammelt auch das globale Maximum nur aus diesem kleinen Bereich Stimmen ein und erhält im Vergleich zu lokalen Maxima auch nicht mehr Stimmen. Wählt man k sehr groß, werden nur wenige Maxima gefunden, die dann die Stimmen eines großen Bereichs auf sich vereinigen. Allerdings bringt ein großes k einen höheren Rechenaufwand mit sich. Der Parameter t sollte deutlich kleiner als k gewählt werden. Wählt man t jedoch größer als eins (etwa 3 bis 5), bekommen auch bei Punkten entlang eines verrauschten Grates mit ähnlichen Höhenwerten dennoch nahezu alle Punkte des Grates Stimmen. Damit wird erreicht, dass die Punkte mit den höchsten Stimmanzahlen nicht isoliert auftreten, sondern die Struktur der Erhöhung mit erfasst wird. Dieses Salienzmerkmal ist in Abbildung 9.31 auf einer Punktwolke dargestellt. Die Punkte sind dort entsprechend der abgegebenen Stimmen von rot über gelb und grün bis blau eingefärbt, wobei Punkte ohne Stimme rot und mit vielen Stimmen blau gezeichnet sind.

Durch die Verwendung einer festen Anzahl nächster Nachbarn passt sich das Merkmal adaptiv an die Samplingdichte an, analog wie es auch in Abbildungen 9.11 und 9.12 näher erläutert wird. Aus diesen salienten Punkten kann dann z. B. durch Schwellwertbildung über die Anzahl der Stimmen eine Art Fingerabdruck des Terrains erstellt werden.

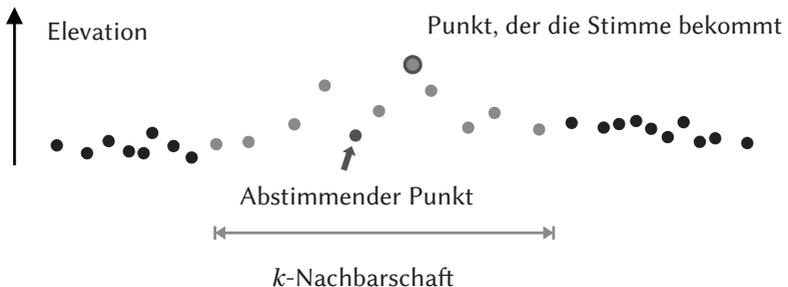


Abbildung 9.30: Darstellung des Stimmabgabeprozesses für $t = 1$ und $k = 10$ als Seitenansicht.



Abbildung 9.31: Darstellung des Salienzmerkmals auf unverbundenen Punktwolken. Färbung der Punkte gemäß der Anzahl der erhaltenen Stimmen von rot nach blau. *Oben:* Schrägsicht auf Ausschnitt der Punktwolke. *Unten:* Punktwolke aus der Vogelperspektive. Die Farbgebung lässt bereits den Charakter eines Fingerabdrucks erkennen.

In diesem Kapitel werden die genannten Verfahren bewertet und die Auswertungsergebnisse gezeigt.

10.1 Erweiterung des pixelbasierten Verfahrens

In Abbildung 10.1 ist die Schätzung für das Terrain dargestellt. Die Schätzung gibt zwar die Oberfläche weitgehend wieder, erlaubt aber durch die vielen Freiheitsgrade trotz der Regularisierungsterme Oberflächenformen, die nicht unbedingt plausibel sind. Dadurch wurde das Kernelverfahren motiviert, das durch ein Modell mit viel weniger Parametern eine strengere Regularisierung durchführt.

Das Verfahren ist leider störanfällig, wenn die Absolutwerte der Messung vom Modell abweichen. Dann divergiert die Schätzung schnell und schätzt unplausible Oberflächenformen wie z. B. ein stark ansteigendes Terrain, das über die Höhe des Sonarsensors hinaus wächst. Es kann auch zu Oszillation aufgrund der Regularisierung kommen, so dass sich während des Schätzvorgangs Wellen auf der Oberfläche vom Nadir ausbreiten.

Die eher unbefriedigenden Ergebnisse mit diesem Verfahren führten zur Entwicklung des Kernelverfahrens aus Abschnitt 9.4.3.

10.2 1D-Kernelverfahren

Zunächst wird auf die Wahl der Alphabetparameter näher eingegangen, bevor Rekonstruktionsergebnisse zuerst für den 1D-Fall und dann für den 2,5D-Fall gezeigt werden.

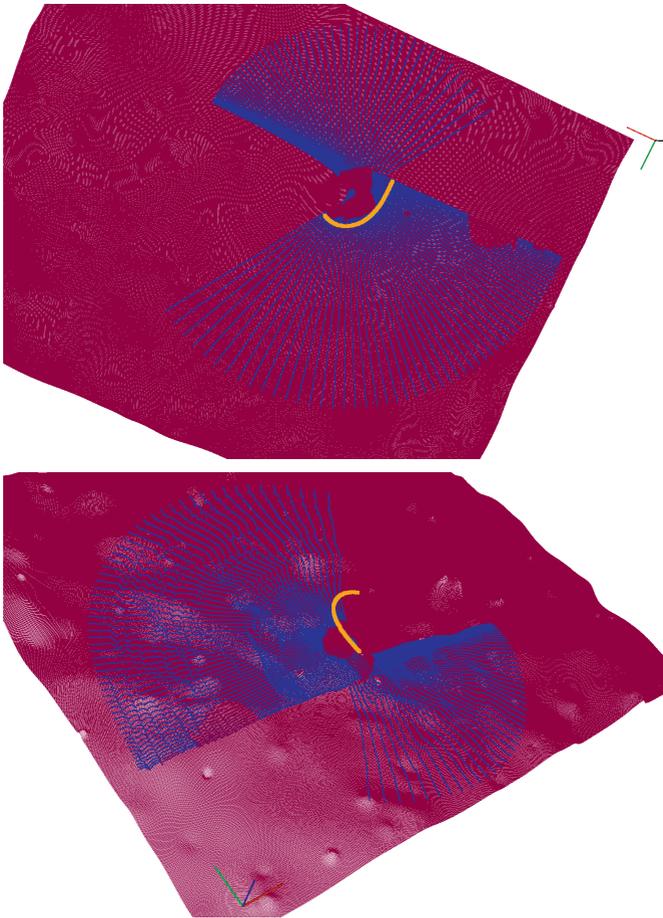


Abbildung 10.1: Zwei Ansichten der Schätzung auf den Sonardaten.

10.2.1 Alphabetparameter

Der Ortsparameter kann gleichmäßig abgetastet werden wie in Abbildung 9.19, es wurde jedoch auch eine äquiangulare Abtastung untersucht, die im Nahbereich enger diskretisiert als in der Ferne. In gleichmäßig abgetasteten Szenarien wurde die Reichweite von etwa 220 m mit 1000 Schritten abgetastet. Im äquiangularen Fall wurde der Öffnungswinkel in 300 Schritte diskretisiert. Durch die äquiangulare Abtastung kann das Alphabet verkleinert werden,

wobei die Auflösung im wichtigen Nahbereich immer noch hoch ist. Der Parameterbereich für die Höhe wurde meist in der Größenordnung von -2m bis 2m gewählt. Für die Untersuchungen im 1D-Verfahren kamen auch Kernel bis 4m zum Einsatz. Die Diskretisierung der Höhe erfolgte meist in 4–8 Schritten. Die Breite wurde in den meisten Experimenten zwischen $0,5\text{m}$ bis 6m gewählt. Die Breitendiskretisierung umfasste 3–6 Schritte. Durch diese Wahl der Parameter ist gewährleistet, dass eine große Bandbreite an Ortsfrequenzen abgedeckt ist. Die Flughöhe des AUV wurde zur Alphabeterkennung zu 20m gewählt. Dies ist eine übliche Höhe über Grund für Kartierungsanwendungen. In Missionen wird versucht, diese Flughöhe konstant zu halten.

Diese Parameterwahl kann nur als Richtschnur dienen. Die Wahl der Alphabetparameter hängt vom Einsatzzweck und den damit verbundenen Bodengeometrien ab.

10.2.2 3-Kernel-Oberfläche

In diesem einfachen Fall wurde die prinzipielle Funktionsfähigkeit untersucht und die Fehlermaße wurden evaluiert. Es wird zunächst eine synthetische Oberfläche Z als Höhenkarte erzeugt indem 3 Kernel so weit voneinander entfernt platziert werden, dass sie sich nicht beeinflussen und die Linearitätsannahme daher erfüllt ist. Das Verfahren findet die Kernelparameter perfekt, d.h. es werden die tatsächlich am nächsten liegenden Alphanumerale gefunden. Die zugehörigen Fehlerflächen sind in Abbildung 10.3 dargestellt. Deutlich sichtbar sind die großen Plateaubereiche und die gering ausgeprägten Minima bei den kleinen Kerneln.

10.2.2.1 Gradientenabstieg auf dem Alphabet

In den Abbildungen 10.4 und 10.5 sind die Verläufe der Gradientenabstiege auf dem Fehlervolumen eingezeichnet. Von vielen zufällig gewählten Startwerten im Parameterraum wurde der Gradientenabstieg auf der Fehlerfläche durchgeführt. Es wurden Experimente mit bis zu hundert Startwerten durchgeführt. Zwei Dinge fallen auf: Zum einen wird der Positionsparameter beim Abstieg selten verändert, zum anderen zeigt die Fehlerfläche eine Art Wall um den korrekten Positionswert. Das sorgt dafür, dass das Gradientenverfahren nur dann das globale Optimum finden kann, wenn der Start-Positionswert

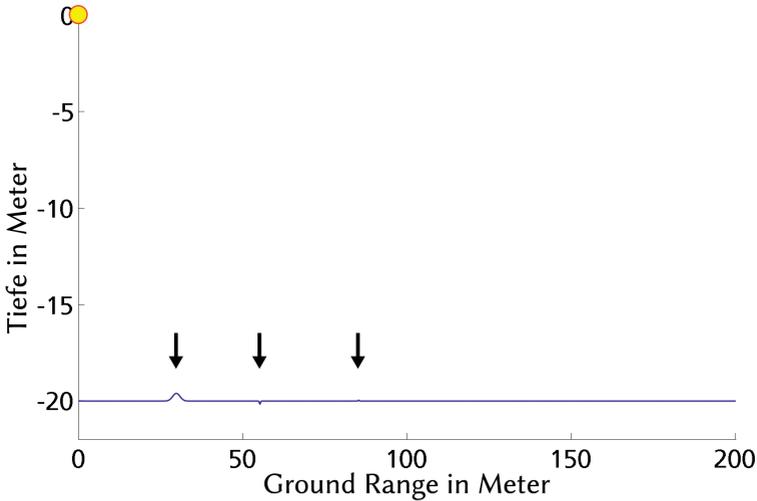


Abbildung 10.2: Testoberfläche bestehend aus 3 Kernen: $k(0.4, 1.1, 29.8)$, $k(-0.2, 0.12, 55.2)$ und $k(0.1, 0.07, 85.2)$. Der dritte Kern ist so klein, dass er in der Abbildung kaum zu erkennen ist.

schon nahe am tatsächlichen Optimum liegt. Eine fehlerhafte anfängliche Höhen- oder Breitenschätzung war hingegen weniger kritisch, da die Fehlerfunktion hier bei den Untersuchungen stets eine konvexe Form hatte und das Optimum gefunden wurde.

Gradientenabstieg in der Nachbarschaft

Es wurde auch untersucht, ob ein Gradientenabstieg ausgehend vom bestpassenden Alphanoteintrag die Schätzung noch verbessern kann. Dafür existieren keine vorberechneten Einträge und das Raytracing muss für jede Platzierung durchgeführt werden. Die Ergebnisse zeigten jedoch keine nennenswerte Verbesserung der Schätzung, insbesondere keine Verbesserung, die den dramatisch gestiegenen Rechenaufwand durch das Echtzeit-Raytracing rechtfertigen würde. Daher wurde dieser Weg nicht weiter untersucht.

10.2.2.2 100-Kernel-Oberfläche

Als nächster Schritt wird eine aus 100 zufälligen Kernen bestehende synthetische Oberfläche geschätzt. Diese ist zusammen mit ihrer Sonarantwort

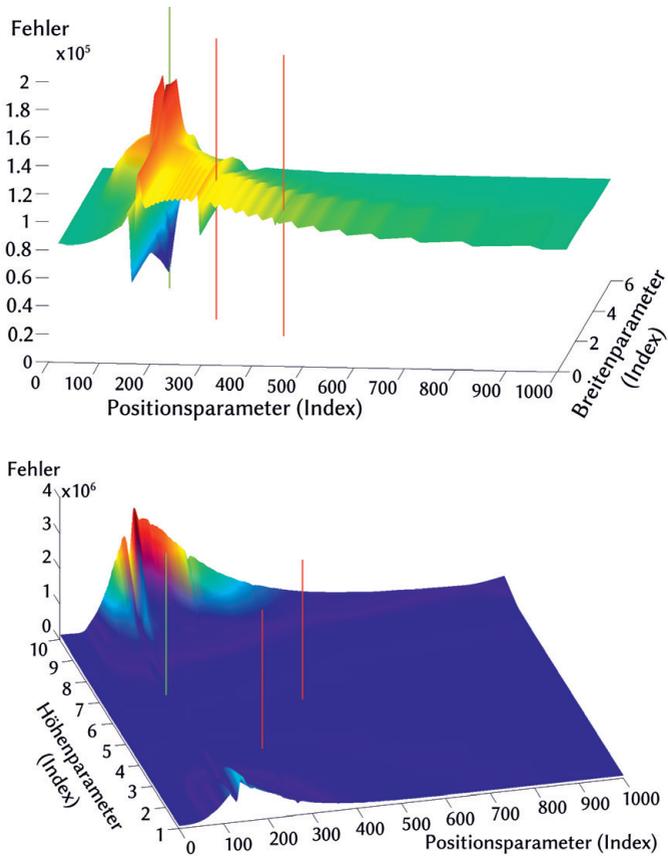


Abbildung 10.3: Schnitte durch die Fehlerflächen zum Fehlermaß E_{sq} auf dem Parameterraum. Oben: Fehler aufgetragen über die Parameter v und p während h fest ist. Unten: Fehler aufgetragen über die Parameter h und p während v fest ist. Die drei roten senkrechten Balken beschreiben die Grundwahrheit, d. h. die den Kernelpositionen tatsächlich im Parameterraum am nächsten liegenden Alphabeteinträge. Der grüne Balken zeigt die durch die Alphabetsuche gefundene optimale Schätzposition. Der grüne Balken überlappt einen der roten Balken, was bedeutet, dass in diesem Fall das Optimum erreicht wurde. Daher ist dieser rote Balken im Bild nicht sichtbar.

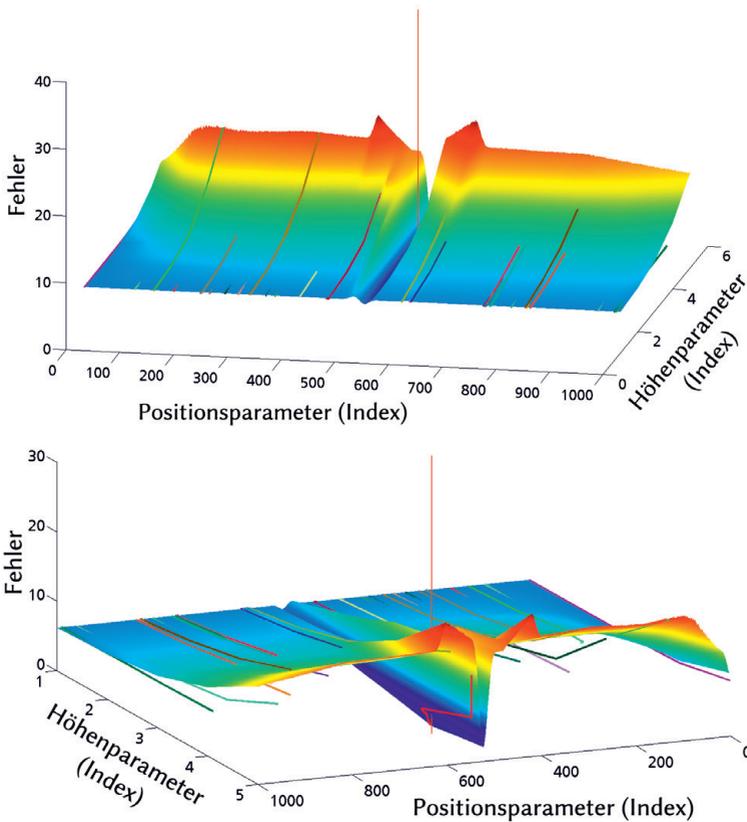


Abbildung 10.4: Verläufe der Gradientenabstiege auf dem Fehlervolumen. Eingezeichnet ist die Fehlerfläche über den Parametern Höhe und Position für den optimalen Parameter Breite. Ein senkrechter Balken, der die Fehlerfläche nach unten durchstößt, zeigt das globale Minimum an.

in Abbildung 10.6 abgebildet. Die Zahl der zu findenden Kernels wurde zu 15 gewählt, so dass eine weniger komplex geformte Oberfläche als Ergebnis erhalten wird. Nicht alle der 100 Kernels haben tatsächlichen Einfluss auf das Sonarbild, da die Kernel, die vollständig im Sonarschatten von größeren Kernels platziert wurden, keinen Beitrag zur Sonarantwort liefern. Dennoch stellt die Anforderung, die Oberfläche mit nur 10 Kernels darzustellen, eine erhebliche Reduktion dar.

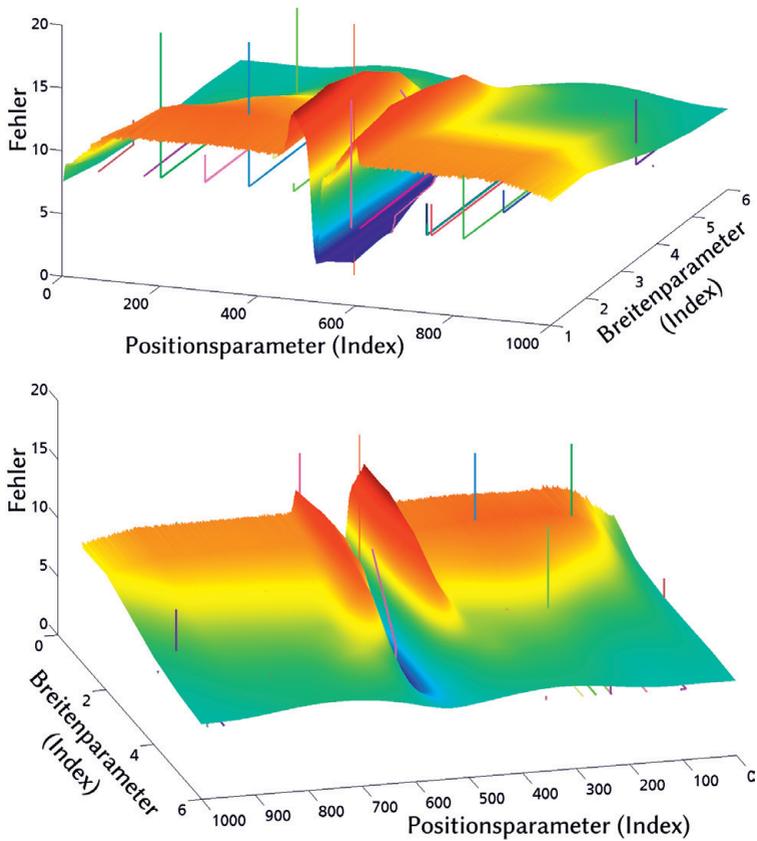


Abbildung 10.5: Verläufe der Gradientenabstiege auf dem gleichen Fehlervolumen wie in Abbildung 10.4. Eingezeichnet ist die Fehlerfläche hier jedoch über den Parametern Breite und Position für den optimalen Parameter Höhe. Ein senkrechter Balken, der die Fehlerfläche nach unten durchstößt, zeigt das globale Minimum an.

Abbildung 10.7 zeigt den Schätzvorgang in der Sonardomäne. Man erkennt gut, dass die Stellen mit den stärksten Signalen zum Zeitpunkt der Platzierung des letzten Kernels in vorherigen Schritten bereits mit Kernen besetzt wurden. Die noch nicht geschätzten (roten) Spitzen, z. B. um Sample 300 herum, sind in einer Größenordnung, die nicht unbedingt Merkmalen zugeordnet sein muss. Es kann sich nämlich auch um Artefakte handeln, die entstehen, weil beispielsweise bei der Schätzung eines Kernels der

bestpassende Alphaneteintrag dennoch nicht perfekt passt und nach Abzug desselbigen ein Rest übrig bleibt. Wird die Anzahl der zu findenden Kernels zu hoch gewählt, versucht das Verfahren solche Schätzfehler nachzubessern und beginnt auch im Rauschen scheinbar sinnvolle Kernels zu finden. Man muss also einen Kompromiss finden, zwischen der Erfassung aller wichtigen Oberflächenelemente und der Gefahr, nichtexistente Objekte zu schätzen.

Am Ende der Schätzung ist die Sonardomäne durch die Alphaneteinträge gut approximiert (Abbildung 10.8). Die mit dieser Sonarschätzung assoziierte Kernel-Höhenkarte Z ist zusammen mit der Ground-Truth-Kernelrepräsentation in Abbildung 10.9 abgebildet. Die Schätzung gibt die hervorstechendsten Merkmale korrekt wieder und stellt eine gute Repräsentation der ursprünglichen Oberfläche dar.

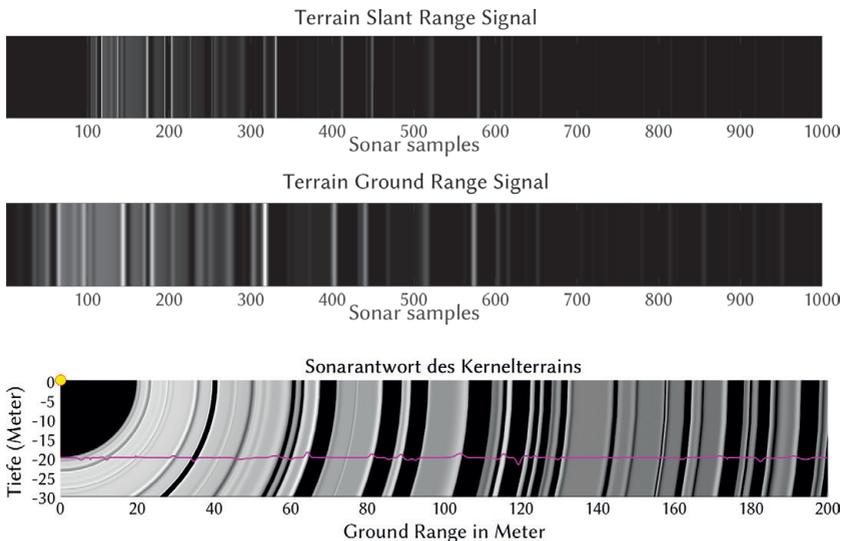


Abbildung 10.6: Oben: Messung des Kernelterrains in *slant range* und Bodenkoordinaten *ground range*. Unten: Grundwahrheit der Oberfläche überlagert mit den logarithmierten *slant range* Messwerten. Im Ursprung ist die Sonarquelle markiert.

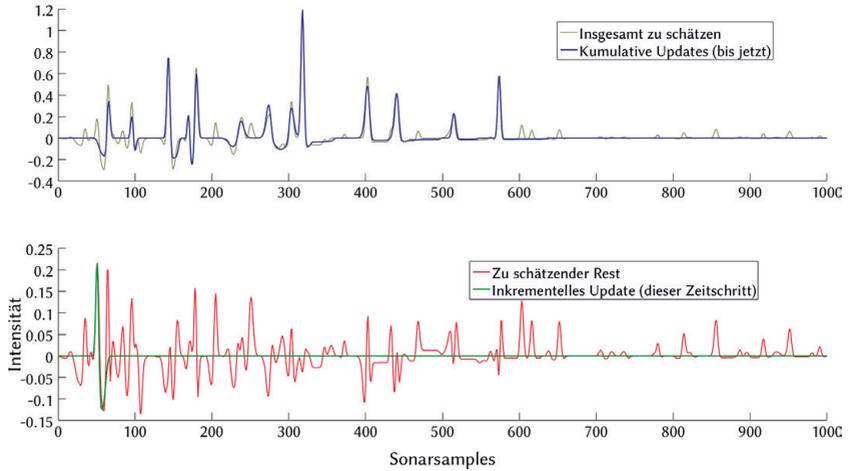


Abbildung 10.7: Sonardomäne zum Zeitpunkt des letzten Zeitschritts der Schätzung. Oben dargestellt ist in grau die Summe aller Alphabeteinträge bis zum aktuellen Zeitschritt darstellt, während die blaue Linie die Summe aller Alphabeteinträge bis zum aktuellen Zeitschritt darstellt. Unten ist der verbleibende zu schätzende Rest m_R in rot dargestellt, der im aktuellen Zeitschritt gefundene Kernel $a(h, v, p)$ (oder ein davon ausgehend verbesserter Kernel) ist in grün dargestellt.

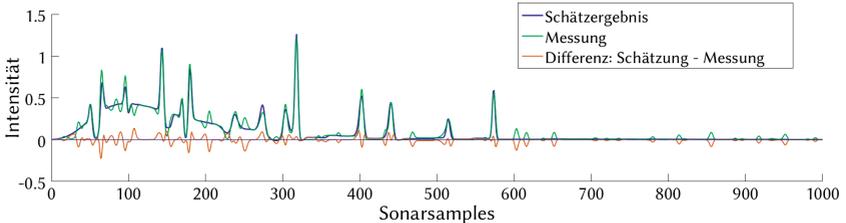


Abbildung 10.8: Vergleich der Sonardomänen nach der Schätzung. Der Beitrag des flachen Meeresbodens ist hier noch enthalten. Die Originalmessung m ist grün dargestellt, während die kumulierte Schätzung blau gezeichnet ist. Die verbleibende Restmessung m_R ist in rot gezeichnet. Die Schätzung besteht aus 15 Spitzen, die zu den 15 Kernen gehören, die gefunden werden sollen.

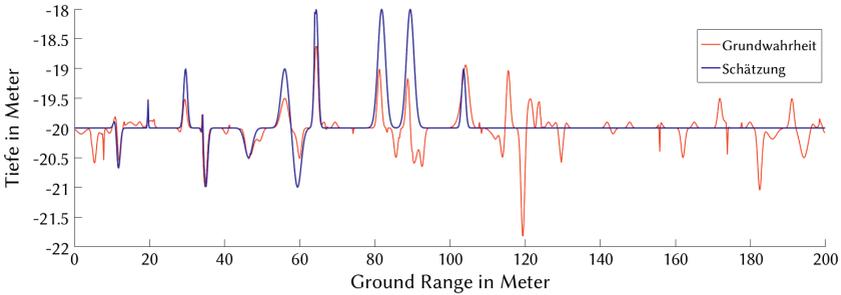


Abbildung 10.9: Resultierende Höhenkarte Z nach dem Einfügen von 15 Kernen. Die Schätzung erfasst die wichtigsten Oberflächenelemente. Man beachte die überhöhte Achsenskalierung zu Darstellungszwecken.

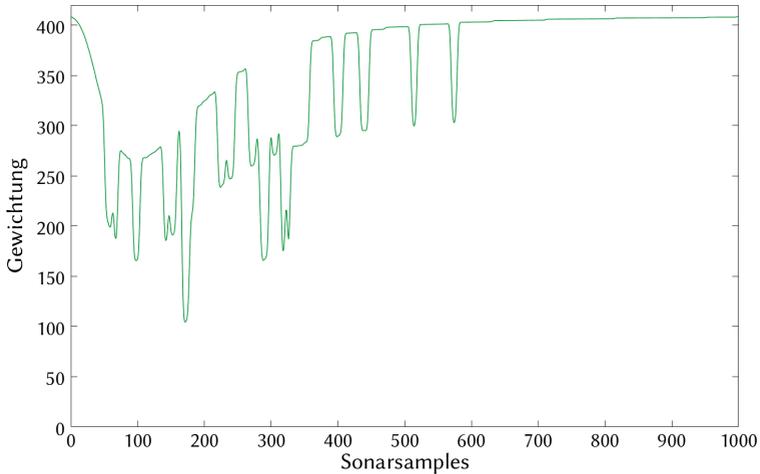


Abbildung 10.10: Der Gewichtsterm $w^B + w^{PC}$ nach dem Einfügen von 15 Kernen.

10.3 2,5D-Kernelverfahren

10.3.1 Testterrain

Für die Auswertung mit einer globalen Karte wurde ein Terrain von 200×200 Metern erzeugt und 3 Kernel darauf platziert. Die verwendeten Kernel $k(h, \mathbf{C}, \mathbf{p})$ sind:

$$k_1 = k \left(1,5, \begin{pmatrix} 4,05 & -6,1 \\ -6,1 & 13,2 \end{pmatrix}, (0, 0) \right) \quad (10.1)$$

$$k_2 = k \left(1,0, \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, (0, 8) \right) \quad (10.2)$$

$$k_3 = k \left(1,0, \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, (0, -10) \right) \quad (10.3)$$

Dieses ist in Abbildung 10.11 dargestellt. Die Werte von k_1 sind so gewählt, dass er in Richtung $(1, -2)$ zeigt.

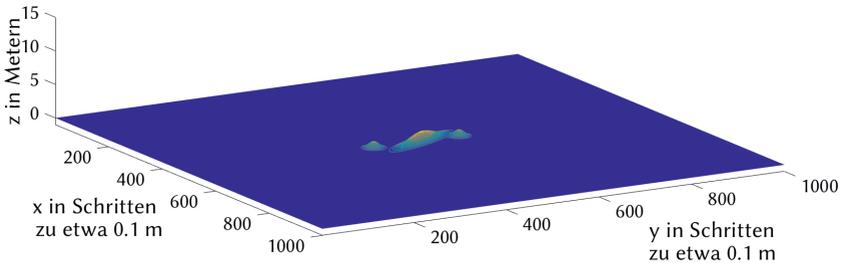


Abbildung 10.11: 3D-Ansicht des Terrains bestehend aus 3 Kernels.

10.3.2 Parabel-Trajektorie

Ein parabelförmiger Überflug wurde gewählt, um zu untersuchen, wie sich das Verfahren bei Wendemanövern des Fahrzeugs schlägt. Häufig werden Daten nicht verwendet, wenn sie aus Phasen mit einer stark von Geradeausfahrt abweichenden Eigenbewegung stammen. Der Grund dafür ist die extrem unterschiedliche Abtastung des befahrenen Gebiets (siehe Abschnitt 9.1.2) und die damit für 2D-Bildverarbeitungsansätze nicht mehr sinnvoll mögliche klassische Darstellung als Bildstapel. Das geometrische Setup des Experiments ist in Abbildung 10.12 dargestellt. In Abbildung 10.13 sind die resultierenden Sonardaten aus dem Parabelförmigen Überflug gezeigt. Diese wurden mit einem linearen FM-Puls simuliert und für Darstellungszwecke linear helligkeitsskaliert.

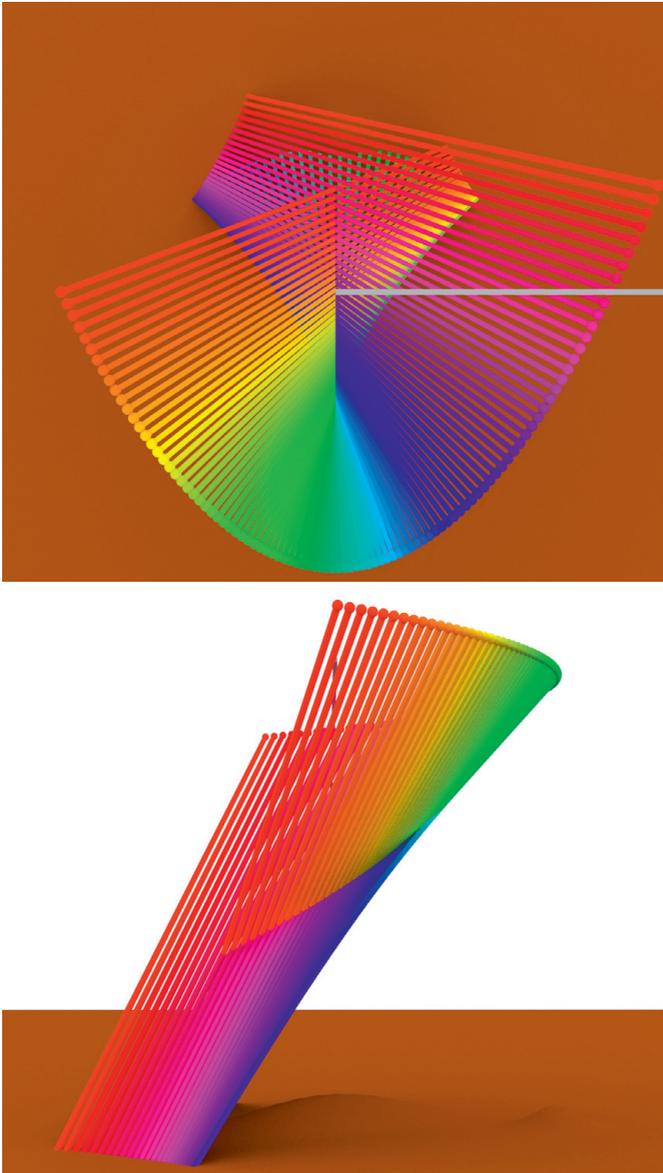


Abbildung 10.12: Übersicht über das Experiment. Parabelförmiger Flug über das Testterrain. Es werden 100 Sonaraufnahmen gemacht.



Abbildung 10.13: Eingabedaten für den Algorithmus: 100 simulierte Sidescan-Sonarlinien im FM-Basisband-Modus zu einem Bildstapel gestapelt.

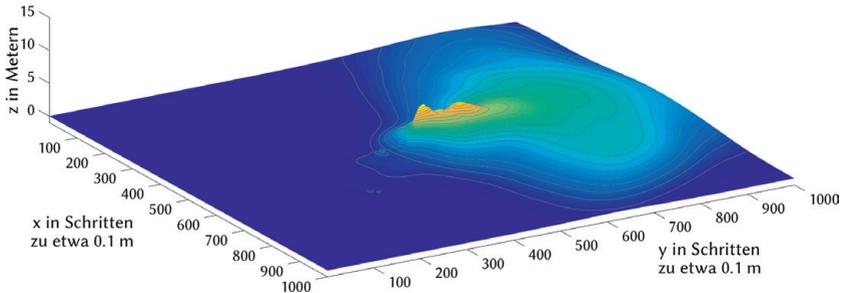


Abbildung 10.14: Schätzung des 3-Kernel-Terrains nach einer parabelförmigen Überfahrt.

Die Ergebnisse der Schätzung sind in Abbildung 10.14 dargestellt. Die Gesamtstruktur aus 3 Peaks wird gut wiedergegeben, auch die nah beieinander liegenden Peaks werden klar getrennt. Im Bereich »hinter« den drei Kernels (vom Sonar aus gesehen) wird der Meeresboden jedoch als zu hoch geschätzt.

10.3.3 Box-Trajektorie

Als Grundwahrheit dient wieder das Terrain wie eben, in Abbildung 10.15 dargestellt mit anderer Skalierung der Z-Achse. Als Trajektorie kommt eine

quadratische Form zum Einsatz. Jede Quadratseite besteht aus 59 Aufnahmen auf einer Länge von je 48 Metern.

Die Simulation einer Box-Trajektorie zeigt die Leistungsfähigkeit des Verfahrens, wenn Objekte von mehreren Seiten betrachtet werden. Das Fahrzeug fährt eine quadratisch geformte Trajektorie in konstanter Höhe über einem Terrain mit 3 Kernen an bekannter Position ab und nimmt pro Quadratseite 25 Messungen auf. Das Setup der Szene ist in Abbildung 10.16 gezeigt.

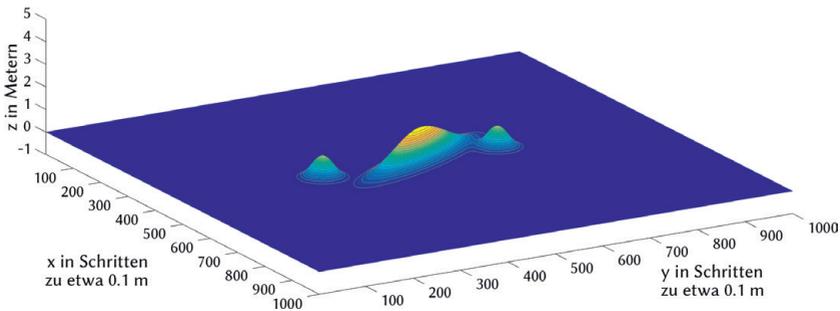


Abbildung 10.15: Grundwahrheit 3-Kernel-Terrain, dargestellt mit anderer Skalierung der Z-Achse.

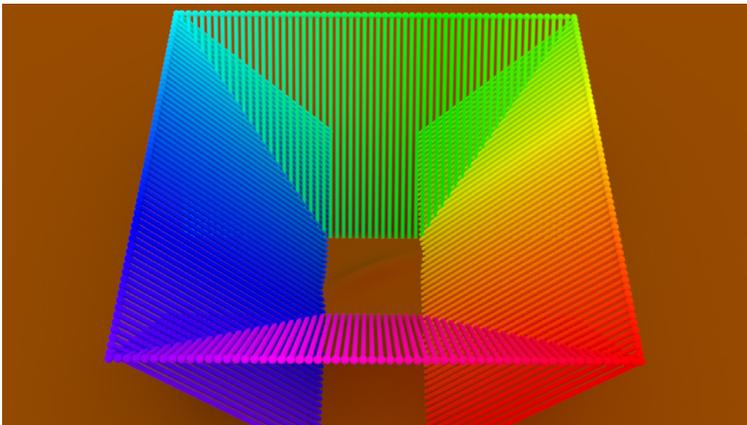


Abbildung 10.16: Übersicht über die Box-Trajektorie des Experiments.



Abbildung 10.17: Eingabedaten für den Algorithmus: 100 simulierte Sidescan-Sonarlinien im linearen FM-Modus zu einem Bildstapel gestapelt. Die Daten werden zur besseren Sichtbarkeit logarithmisch dargestellt.

Die Sonar-Eingabedaten in das Verfahren sind in Abbildung 10.17 abgebildet. Durch die Einzellinienschätzung werden die Kernelplatzierungen geschätzt, die in Abbildung 10.18 abgebildet sind. Gezeigt ist dort lediglich die Position der Kernels, keine Höhe oder Breite. Diese Kandidatenkernels sind die Eingabedaten zum Fusionsschritt. Die fusionierte Karte der Kernels ist in Abbildung 10.19 dargestellt, in Zwischenschritten nach jeweils 59 Wegpunkten.

Während der Vorbeifahrten auf der ersten Quadratseite, in der die große Ausdehnung des mittleren Kernels fast in Across-Track-Richtung zeigt, wird ein breiterer Kernel mit wenig Struktur geschätzt. Durch die Fahrt senkrecht dazu auf der zweiten Quadratseite ist deutlich zu sehen, dass der Kernel mit anderen Kandidaten zu einer klareren Ausprägung fusioniert wird. Es ist auch deutlich zu erkennen, dass ein Großteil der Kandidatenkernel im Fusionsschritt zusammengeführt werden. Die großflächigen Bereiche außerhalb des Quadrats sind Artefakte, die durch das Rauschen der Messung verursacht werden. Durch die geringe Höhe und extrem große Ausdehnung spielen diese Bereiche für die Wiedererkennung jedoch keine Rolle.

In Bereichen abseits der 3 Kernel, also bei quasi »leerer« Messung werden bedingt durch Rauschartefakte im Vergleich mit der rauschfreien Referenz sehr breiter und sehr flache Kernel im immer gleichen Abstand als beste Schätzung gefunden, die sich in Abbildung 10.18 als Linie niederschlagen.

Dies stellt jedoch kein Problem dar, da durch die Fusion noch größere Kernel entstehen, die später als Landmarke keine örtliche Diskriminanz erlauben würden und daher nicht nützlich für Lokalisierungsfragestellungen sind. Die meisten dieser Kandidatenkernels werden jedoch bereits beim Fusionsschritt verworfen.

In Abbildung 10.20 ist das Schätzergebnis aus den Messungen der Box-Trajektorie zu sehen. Die Höhenwerte sind durch die größere Zahl an Aufnahmen näher an der Grundwahrheit als bei der Parabeltrajektorie. Die Trennung der beiden nah beieinander liegenden Kernels gelingt gerade noch.

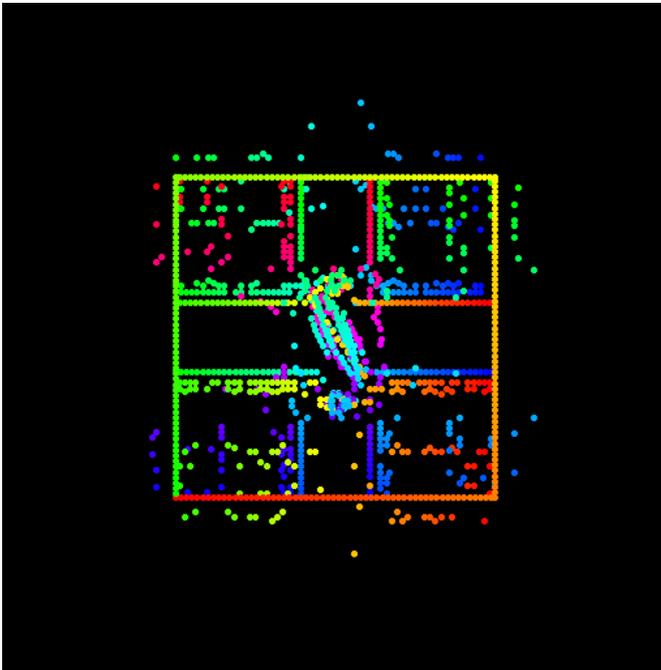


Abbildung 10.18: Übersicht über die Positionen aller Einzelkernel aus der 1D-Schätzung, die zur Fusion herangezogen werden. Farbcodierung nach Zeit: Trajektorie von rot über orange und gelb nach grün. Zugehörige Kernelpositionen wechseln schneller: Von grün über türkis und blau (1. Quadratseite), zu blau, lila und rot (2. Quadratseite), weiter in rot, gelb, grün (3. Quadratseite) und schließlich wieder grün, türkis und blau (4. Quadratseite).

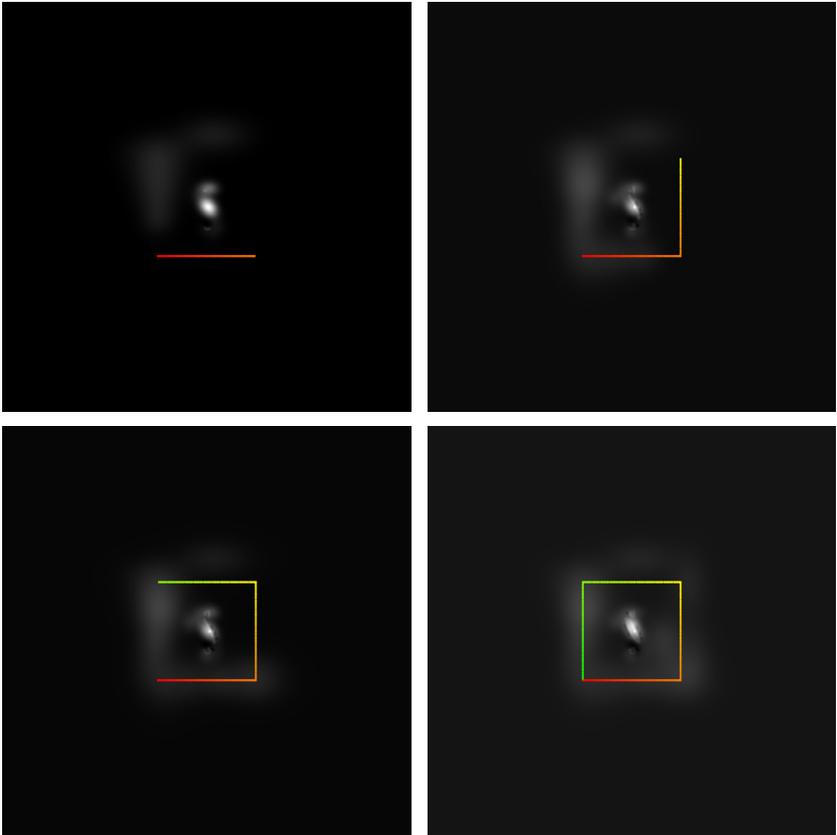


Abbildung 10.19: Schätzvorgang zu den Zeitschritten 59, 118, 177 und 236, also jeweils nach Abschluss einer Kante der quadratisch geformten Trajektorie.

10.4 Synthetische Auswertung des MRF-Verfahrens

Die Schätzung aus dem MRF-Verfahren verwendet die Box-Trajektorie über einer Kugeloberfläche, die nicht mittig im Rekonstruktionsvolumen liegt. Die Szenengeometrie ist in Abbildung 10.29 dargestellt. Als Rückstreumodell wurde das Lommel-Seeliger-Gesetz (siehe Gleichung (4.17)) mit isotroper Rückstreuung verwendet.

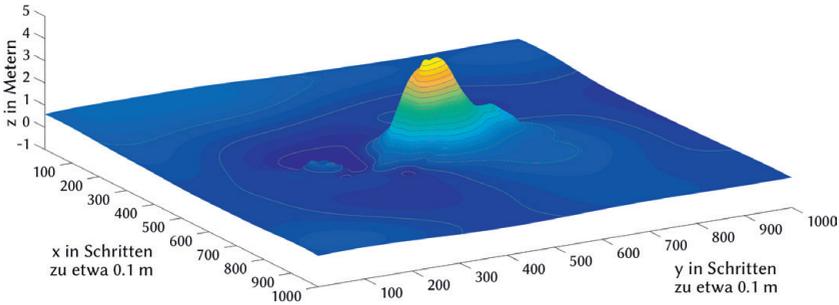


Abbildung 10.20: Schätzung der Oberfläche durch Messungen entlang der Box-Trajektorie.

Zudem wurde eine isotrope Antennencharakteristik angenommen. Zusätzlich wird angenommen, dass das TVG die Ausbreitungsdämpfung perfekt korrigiert. Des Weiteren wurden die Daten rauschfrei erzeugt.

Als einfaches Ground-Truth-Objekt dient ein Oberflächenstück einer großen Kugel, die aufgrund der Sonardaten rekonstruiert werden soll. Die Daten wurden mit einer Box-Trajektorie aufgenommen, die Quadrate von 20 Metern Kantenlänge beschreibt. Pro Quadratseite wurden 50 Messungen gemacht, was einem Abstand von 40 cm zwischen zwei Messungen entspricht.

Um die generelle Funktionsfähigkeit des Verfahrens zu demonstrieren, wurde ein Sidescan-Sonar mit einem sehr breitem Azimutwinkel φ_a von 12° simuliert. Dadurch ist eine Überlappung der Messungen garantiert. Der Elevationswinkel φ_e beträgt hier 30° . Die Dichte der Raytracing-Strahlen zur Erzeugung blieb gleich, wodurch 1380×3269 Strahlen ausgesendet wurden. Die Aufnahmegeometrie mit der Trajektorie und den »Blickrichtungen« des Sonars ist in Abbildung 10.21 dargestellt. Das resultierende Sonarsignal eines einzelnen Wegpunktes ist stellvertretend durch das Signal von Wegpunkt 11 in Abbildung 10.22 zu sehen.

Ergebnisse der direkten Inferenz sind nur für eine relativ grobe Auflösung handhabbar. Die Diskretisierung des Rekonstruktionsvolumens und einige Beispielbeams sind mit der Ground-Truth-Oberfläche in Abbildung 10.23 zu sehen.

Die Rekonstruktionsergebnisse sind für eine negative Einzelknotenenergie in Abbildung 10.24 dargestellt. Damit ist die Standardbelegung des Voxels

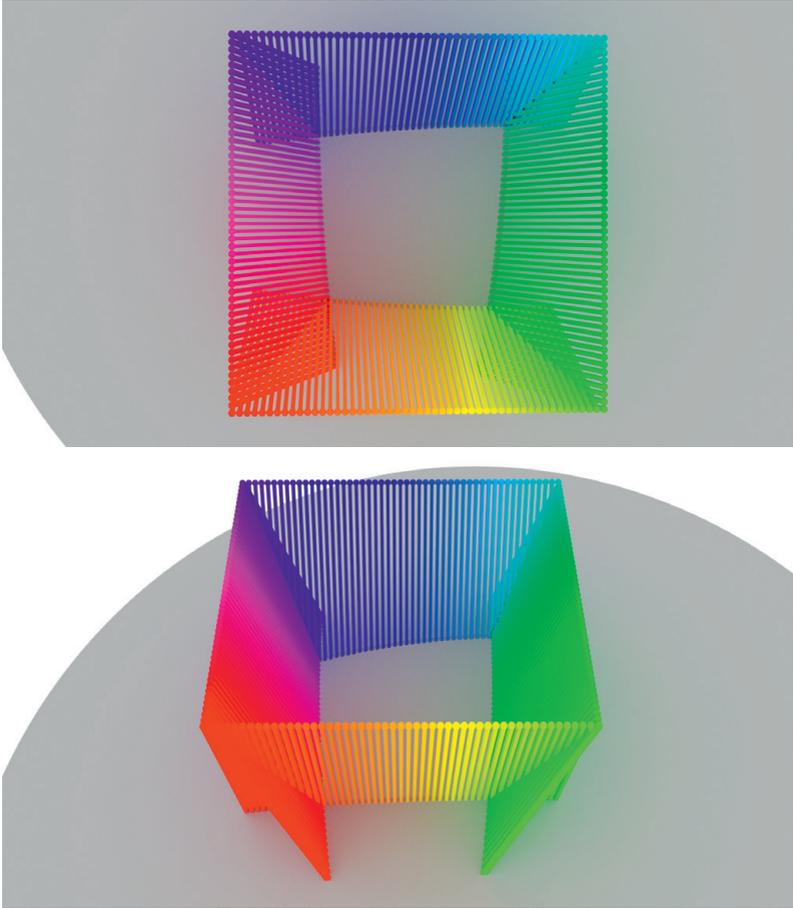


Abbildung 10.21: Vogelperspektive und Schrägsicht der synthetischen Szenengeometrie. Die kleinen Kugeln stehen für die Wegpunkte an denen eine Sonardatenaufnahme gemacht wurde. Die Stäbe, die aus den Wegpunkt-Kugeln herauskommen, geben die Richtung der Hauptkeule des Sonars an. Die Kugel hat einen Radius von 50 Metern und ihr Mittelpunkt liegt bei $(7, 9, -40)$, die Trajektorie verläuft auf einer Höhe von 20 Metern von -10 Meter bis 10 Meter auf jeder Quadratseite. Pro Seite des Trajektorienquadrats gibt es 50 Wegpunkte. Die Sensoren schauen unter einem Winkel von 20° zum Lot auf die Oberfläche.



Abbildung 10.22: Sonardaten von Wegpunkt 11. Gezeigt ist die volle Auflösung mit 2000 Samples (oben), von denen aber nur sehr wenige belegt sind. Eine Ausschnittsvergrößerung der Samples 120–150 zeigt, dass alle Sonarantworten sich auf nur 16 Samples konzentrieren.

diejenige, belegt zu sein. Die Messungen »höhlen« gewissermaßen das Volumen aus. Dies erklärt auch die Schätzung in der oberen Ecke, wo kein Sonarbeam das Volumen trifft.

Die Paarknotenenergien sind null, es wird also keine Glättung durchgeführt. Die Oberfläche der Rekonstruktion wird aus der Belegung in allen Beispielen mit dem Marching-Cubes-Algorithmus erzeugt, indem die Oberfläche mit Subpixelgenauigkeit dort platziert wird, wo die Belegungswahrscheinlichkeit 50 Prozent beträgt.

In der Rekonstruktion in Abbildung 10.25 wurde die Einzelknotenenergie positiv initialisiert, was einer Nicht-Belegung entspricht. Hier ist deutlich zu sehen, dass um die wahre Oberfläche herum eine Belegung geschätzt wird. Dies resultiert in zwei Begrenzungsflächen, eine oberhalb und eine unterhalb der wahren Oberfläche.

Auch hier sind die Paarknotenenergien null. Es findet keine Glättung der Oberfläche statt.

In den folgenden Rekonstruktionen ist die approximative Lösung mit der Hilbert-Parametrisierung dargestellt. Dadurch kann die Diskretisierung feiner gewählt werden. Dies ist in Abbildung 10.26 dargestellt. Als initiale Schätzung werden hier konstante Tiefenwerte angenommen um die herum entlang der Hilbert-Kurve nach einer Belegung gesucht wird. Das ist für ein zur Hochachse geneigtes Sonar zwar keine besonders ausgefeilte Initiallösung, dies tut dem Konzept grundsätzlich jedoch keinen Abbruch.

Die Rekonstruktionsergebnisse sind für initial leere Voxel in Abbildung 10.27 dargestellt.

Nun wird noch das Rekonstruktionsergebnis für negative Einzelknotenenergie gegeben, bei dem noch eine Paarknotenenergie hinzugefügt wurde.

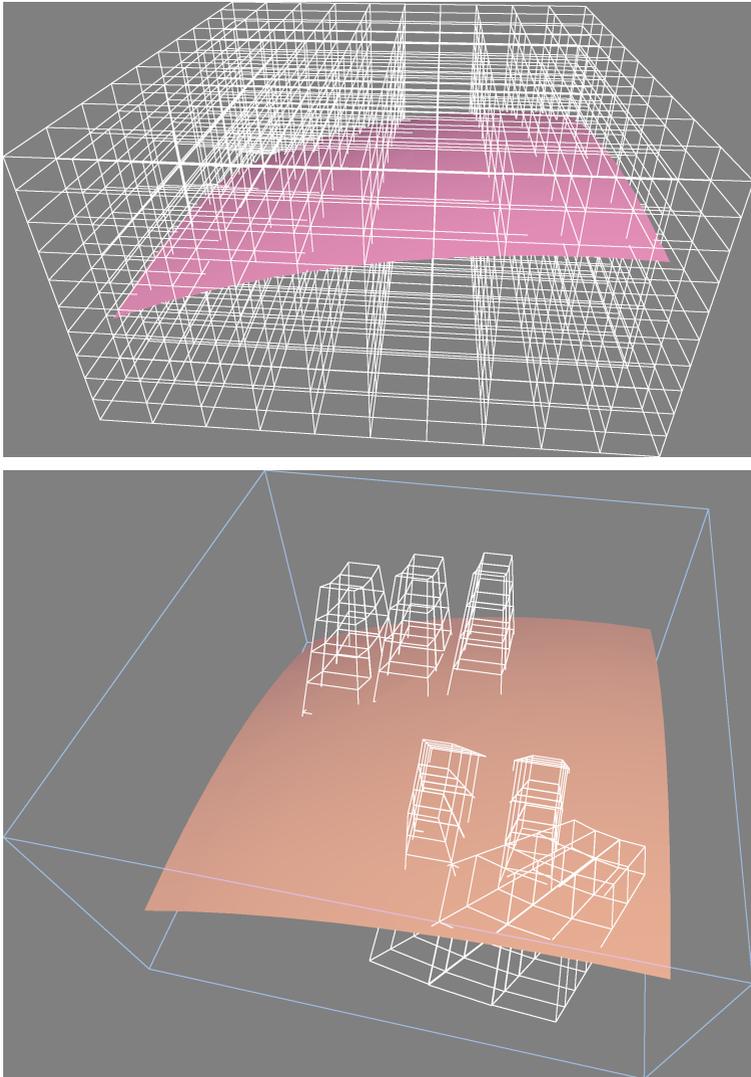


Abbildung 10.23: Diskretisierung des Rekonstruktionsvolumens (oben) und sechs Beispiel-Beams aus den zugehörigen Sonarpositionen über der Ground-Truth-Oberfläche (unten).

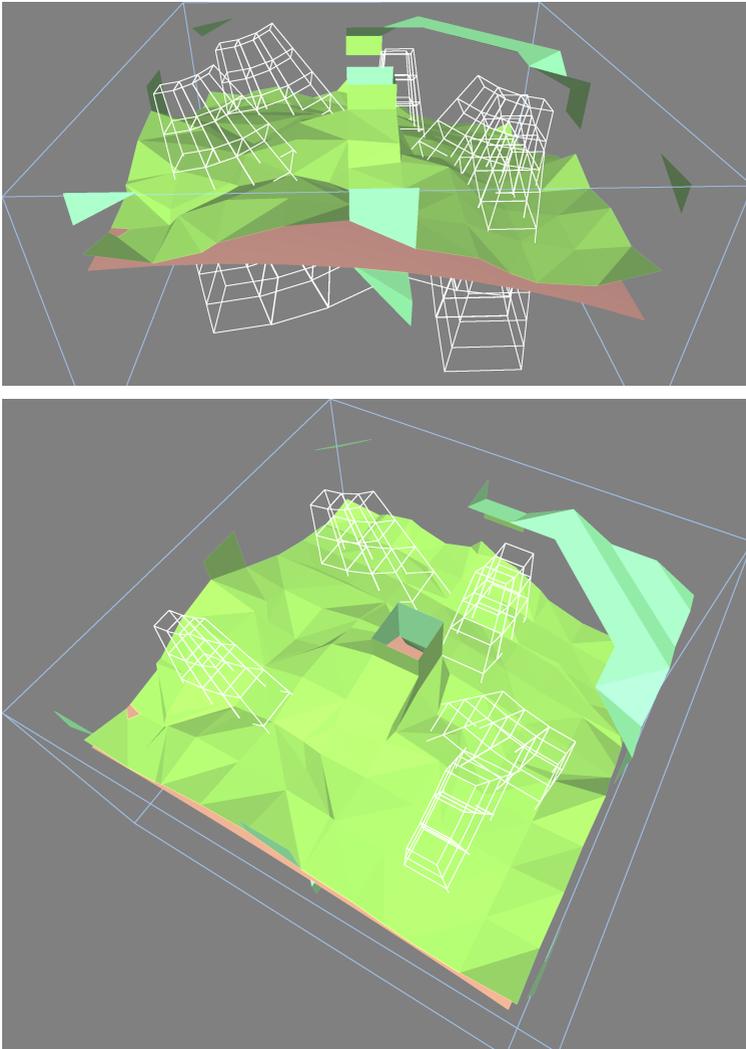


Abbildung 10.24: Rekonstruktionsoberfläche aus zwei Ansichten. Deutlich zu sehen, die »Aushöhlung« der a priori belegten Voxel. In der Mitte, wo wenige Messungen das Volumen treffen, ist daher eine Erhebung zu sehen.

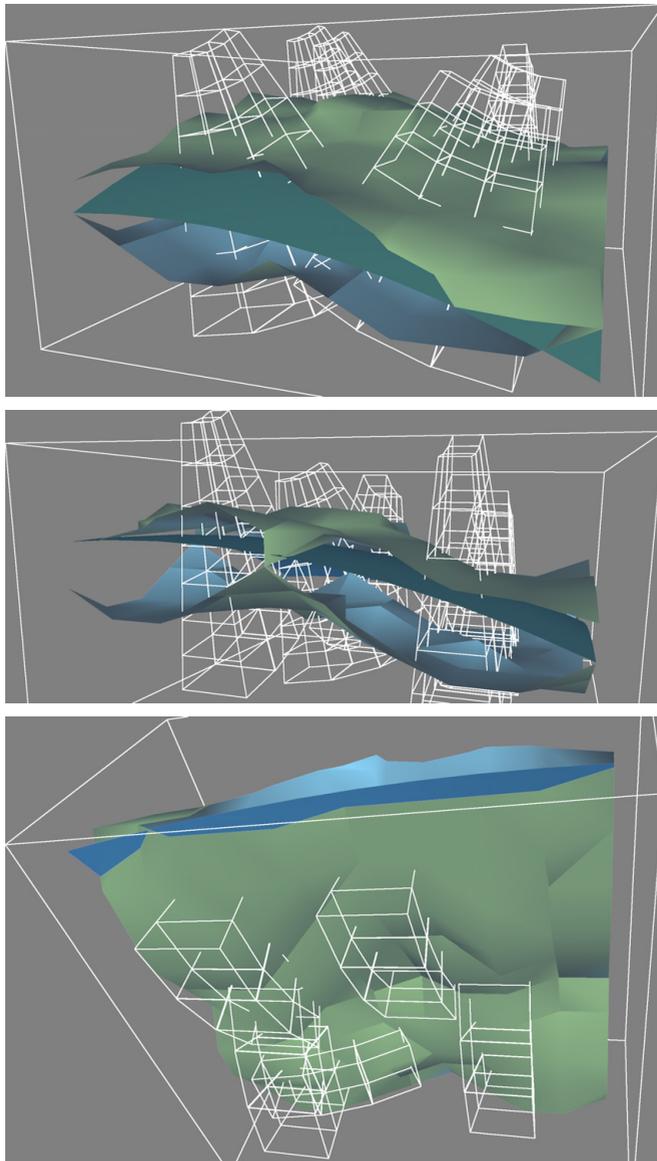


Abbildung 10.25: Rekonstruktionsoberfläche aus drei Ansichten. Deutlich zu sehen ist hier die obere und untere Begrenzung, die von der a priori angenommenen Nicht-Belegtheit stammt.

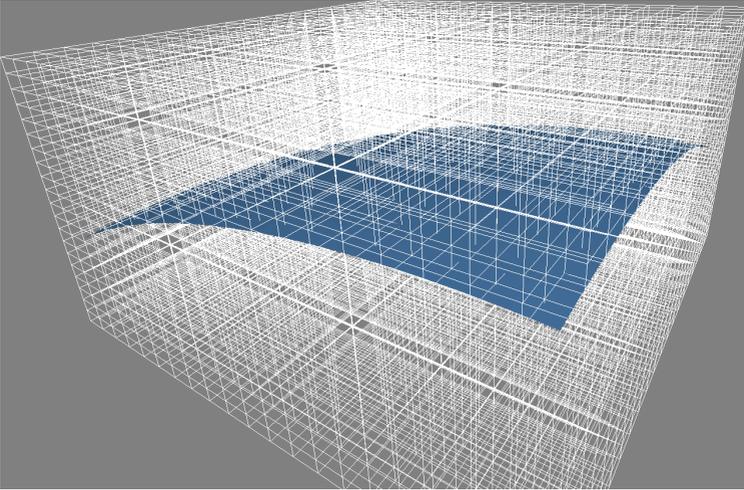


Abbildung 10.26: Feinere Diskretisierung des Rekonstruktionsvolumens im Falle der Hilbertkurvenparametrisierung.

Die »Aushöhlung« des Volumens ist durch die höhere Auflösung noch deutlicher erkennbar. Dies ist in Abbildung 10.28 abgebildet.

Abschließend wird als Ausblick noch der Fall von sehr schmalen Sidescan-Beams (die im Simulator genannte Apertur von $2 \times 60^\circ$) gezeigt. Die Aufnahmen wurden entlang einer etwa halb so dicht abgetasteten und mit 48 Metern Quadratseitenlänge deutlich längeren Trajektorie erzeugt. Von den 2000 Samples der Aufnahme sind dann etwa 250 Samples mit Intensitätswerten belegt. Dies entspricht Echos aus bis zu ca. 28 Metern. Der Winkel zum Lot wurde nun mit 50° realistischer gewählt.

Die Schätzung ist in Abbildung 10.30 abgebildet. Die starke Rauheit der Oberfläche kommt durch die Paarknotenenergien, die zu null gewählt wurde und daher keine Glättung stattfindet. Es ist zu erkennen, dass die Oberfläche von den Messungen in Richtung der wahren Form »weggedrückt« wird. Das Schätzergebnis gibt die wahre Oberflächenform grob wieder.

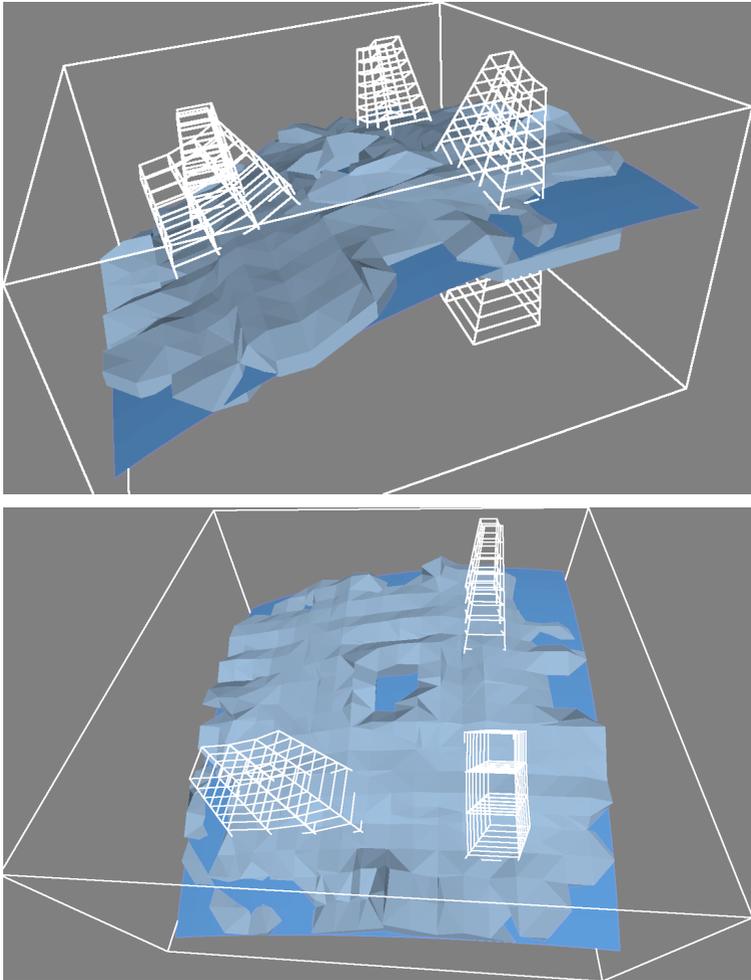


Abbildung 10.27: Rekonstruktionsoberfläche aus drei Ansichten. Dort, wo die Messungen eine gute Abdeckung liefern, wird den Voxeln eine Belegung zugewiesen. Eingezeichnet erneut Beispiel-Beams, die hier höher aufgelöst sind, als bei der direkten Lösung.

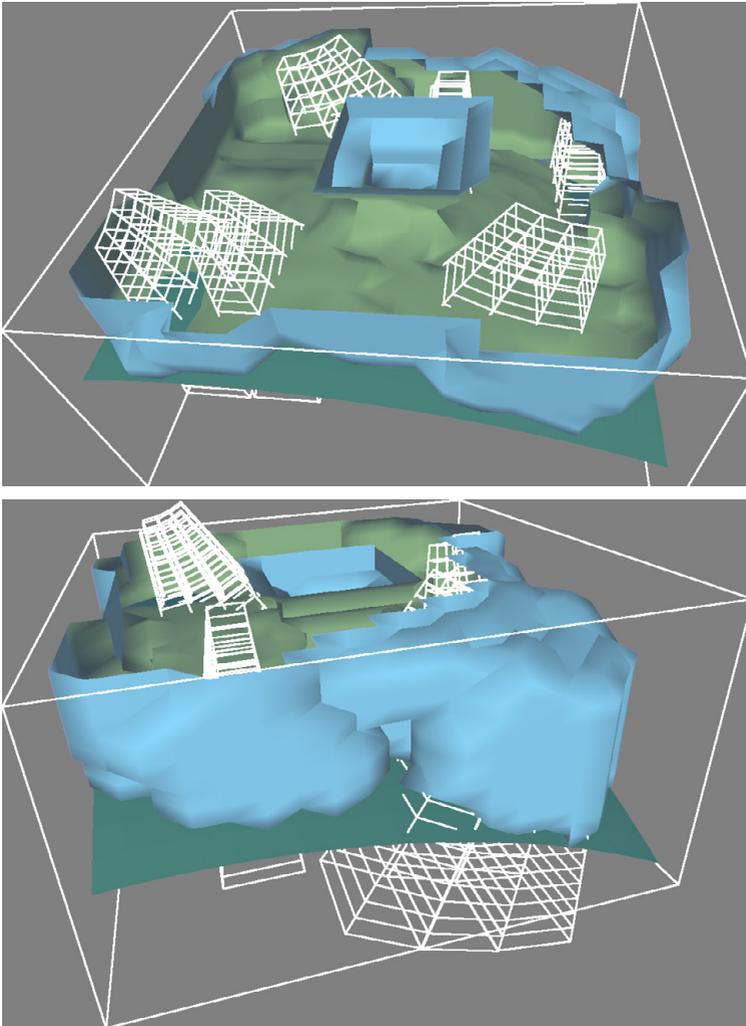


Abbildung 10.28: Rekonstruktionsoberfläche aus zwei Ansichten. Der Übersichtlichkeit halber sind nur wenige Beispiel-Beams eingezeichnet. Die Messungen »höhlen« das Volumen bis zur Grundwahrheit aus.

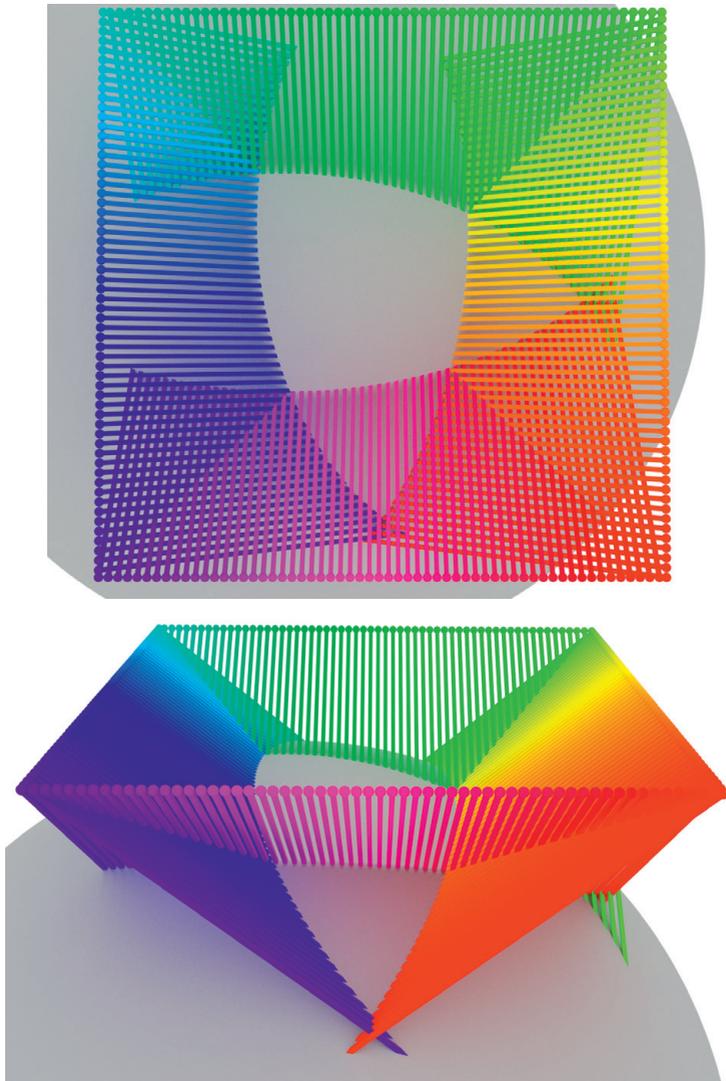


Abbildung 10.29: Vogelperspektive und Schrägsicht der synthetischen Szenengeometrie. Die Trajektorie verläuft auf einer Höhe von 20 Metern von -24 Meter bis 24 Meter auf jeder Quadratseite. Pro Seite des Trajektorienquadrats gibt es 59 Wegpunkte. Hier schauen die Sensoren unter einem Winkel von 50° zum Lot auf die Oberfläche.

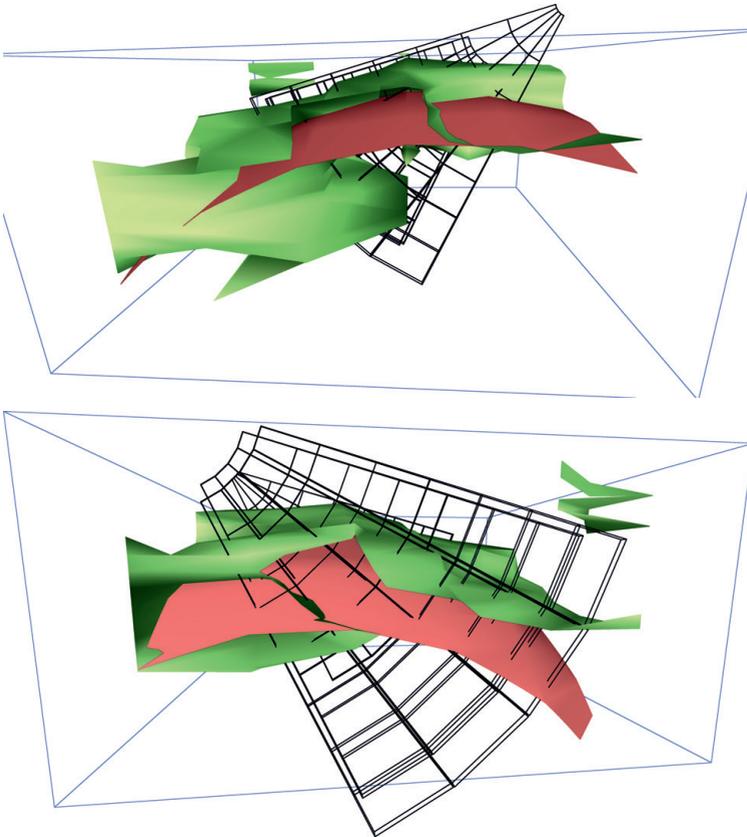


Abbildung 10.30: 3D-Ansicht der Ergebnisse der Schätzung durch das MRF-Verfahren. Die wahre Oberfläche ist in rot eingezeichnet, die geschätzte Oberfläche in grün. Zusätzlich eingezeichnet sind für einzelne Messungen die Sonar-Beams als Drahtgitter.

Zusammenfassung und Ausblick

11.1 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde die Rekonstruktion des Meeresbodens aus Daten eines bildgebenden Sidescan-Sonars untersucht und mehrere Beiträge zu dieser Aufgabenstellung geleistet:

Zur Evaluierung und zur Erzeugung der Rekonstruktionsverfahren wurde ein flexibler Sidescan-Simulator geschaffen, der beliebige Szenengeometrien modellieren kann und nicht auf Höhenkarten beschränkt ist. Er bietet die Möglichkeit, beliebige Fahrzeugtrajektorien und unterschiedliche Sonaraufnahmemodi zu simulieren. Des Weiteren berücksichtigt er die dreidimensionale Antennencharakteristik des Sonars.

Ein bestehendes Rekonstruktionsverfahren aus der Literatur wurde untersucht und die Einschränkung auf Geradeausfahrt durch Einführung einer Punktwolkenrepräsentation aufgehoben. Die für das Verfahren notwendigen Gradienten werden vollkommen transparent durch Normalenvektoren auf entsprechend konstruierten Punktwolken berechnet.

Es wurde ein neues Verfahren vorgestellt, das iterativ eine Rekonstruktion des Signals im Sonarbereich vornimmt, indem die Messung mit vorberechneten Sonarantworten (»Alphabeteinträgen«) verglichen wird. Die zu den ausgewählten Alphabeteinträgen zugehörigen geometrischen Basiselemente (»Kernels«) werden in der Höhenkarte platziert und approximieren die Oberflächenform. Dieses Verfahren für einzelne Sonarmessungen wurde durch einen Fusionsschritt erweitert, der Detektionen in mehreren Messungen in einer globalen 2,5D-Karte zusammenführt.

Des Weiteren wurde ein Verfahren aus dem optischen Raytracing auf zweidimensionale »Sichtstrahlen« erweitert, die der Beschallung durch ein Sidescan-Sonar entsprechen. Dazu wurden »Beam-Faktoren« geschaffen und die zugehörigen Nachrichten für das Message-Passing-Verfahren berechnet. Unter Verwendung dynamischer Programmierung konnte eine beschleunigte Berechnung erreicht werden.

Die genannten Verfahren können generell auch auf Daten anderer bildgebender Sonare, wie etwa vorwärtsschauender Sonare angewendet werden. Mit gewissen Einschränkungen aufgrund des veränderten Schattenwurfs und der konstanten Auflösung können die Verfahren teilweise auch auf SAS-Daten angewendet werden. Dort fallen jedoch überlappende Kacheln an Daten an und keine Einzellinien.

11.2 Ausblick

11.2.1 Simulation

Mehrere Sedimente

Die Unterstützung unterschiedlicher Sedimente ist derzeit noch nicht implementiert. Durch die Einführung unterschiedlicher Sedimente gäbe es eine weitere Möglichkeit Helligkeitsunterschiede im Sonarbild herbeizuführen. Bisher wird in der vorgestellten Simulationsumgebung noch nicht verwendet, dass die Szene für den Renderer unterschiedlich eingefärbt sein darf. Eine Möglichkeit unterschiedliche Sedimente in die Simulation zu integrieren, wäre also wie folgt: Die Grundwahrheit setzt sich aus verschiedenen Bereichen (wie etwa in [Pai10b] oder [Bel95]) zusammen, für die mit verschiedenen Terraingeneratoren Geometrien erzeugt werden. Diese Terrains werden unterschiedlich eingefärbt. Der Sonarsignalsimulator kann dann anhand der Farbinformation ein anderes Rückstreumodell auswählen und Werte für Transmissionsverluste in den Boden auswählen.

Der Vorteil einer solchen Farbmodellierung läge darin, dass man nicht unbedingt auf eine feste Zuordnung von Farbwerten zu Sedimenten beschränkt bleibt: Man könnte eine kontinuierliche Sedimentmischung aus drei Basis-sedimenten wie etwa Fels, Sand und Schlick/Ton erzeugen, indem diese auf die vom Renderer ohnehin unterstützten optischen Grundfarben rot, grün und blau abgebildet werden.

Selbst für noch mehr Basissedimente gäbe es eine Lösung, da der Renderer auch spektrales Rendering unterstützt, d.h. man könnte die Sediment-Korngrößen direkt auf optische Wellenlängen abbilden, braucht dann aber auch ein Rückstreumodell, das diese Sedimentvielfalt handhaben kann.

Mehrwegeausbreitung

Mehrwegeausbreitung wurde nicht betrachtet. Die bestehende Raytracing-Implementierung müsste dafür »aufgebohrt« werden, d. h. in Mitsuba müssten die Daten direkt abgegriffen werden. Die notwendigen Daten für die Mehrwegeausbreitung kann der Raytracer erzeugen, wobei jedoch die gleiche Schwierigkeit wie beim optischen Raytracing auftritt, nämlich das effiziente Sampling des Lichttransportintegrals.

11.2.1.1 Bewegungseinflüsse

Die verwendete Stop-and-hop-Approximation ist zwar keine große Einschränkung, für eine realitätsnahe Nachbildung der Aufnahme müsste der Sensor jedoch während der Aufnahme bewegt werden. Der verwendete Renderer Mitsuba bietet bereits die Möglichkeit der Bewegungsunschärfe durch Bewegung der Kamera. Ob genügend Informationen ausgegeben werden, um dann auch die Änderung der Richtcharakteristik über die Empfangszeit zu beschreiben, bleibt noch zu prüfen.

Erweiterte Bodenmodelle

Das Bodenmodell könnte man statt nach einem einfachen Potenzgesetz multifraktal modellieren. Gagnon et al. [Gag06] beschreiben, dass damit noch realistischere Terrains erzeugt werden können.

11.2.2 Rekonstruktionsverfahren

Wichtig für die Rekonstruktion aus realen Daten ist sicherlich eine bildbasierte Vorsegmentierung zur Unterscheidung der Sedimenttypen. Mit den zugehörigen Rückstrommodellen zu den Sedimenttypen könnten die Rekonstruktionsverfahren die Intensitätsunterschiede besser deuten.

11.2.2.1 Kernelverfahren

Einbezug von Navigationsunsicherheiten

Eine Möglichkeit, Navigationsunsicherheiten in eine Sonarkarte einfließen zu lassen wird in [Che14] vorgestellt, dort allerdings mit der Datenstruktur eines Belegtheitsgitters (engl. *occupancy grid*). Werden in den Fusionsschritt noch die Unsicherheiten der Fahrzeugeigenbewegungsschätzung mit einbezogen, ist man letztlich aber bei einer SLAM-Formulierung angelangt, bei der

aus unsicheren Messungen von Landmarkenpositionen und unsicheren Fahrzeugeigenbewegungsmessungen eine Umgebungskarte geschätzt wird. Die Forschung bietet eine enorme Auswahl an unterschiedlichsten Strategien, wie sich die Messungen kombinieren lassen. Ein Überblick über existierende Verfahren besonders im Hinblick auf Unterwasseranwendungen wurde bereits in Kapitel 7 Abschnitt 7.3 gegeben. Die vorliegende Arbeit beschränkt sich jedoch auf die Erzeugung geeigneter Landmarken für nachgelagerte SLAM-Verfahren.

Andere Optimumssuche

Es ist anzunehmen, dass mit anderen Verfahren, wie etwa stochastischen Optimierungsverfahren (z. B. simuliertes Abkühlen oder evolutionäre Algorithmen), das globale Minimum trotz der Plateauflächen zuverlässig gefunden werden kann. Diese Untersuchung wird dringlicher, wenn mit noch größeren Alphabeten gearbeitet werden soll.

Alphabetsrepräsentation

Dadurch, dass die Alphabeteinträge zu einem großen Teil aus Nullen bestehen, könnten diese effizienter im Speicher abgelegt werden. Ob dies nicht nur Platz- sondern auch Geschwindigkeitsvorteile bringt, ist zu untersuchen, denn das lineare Speicherzugriffsmuster erlaubt eine vektorisierte Verarbeitung der Einträge.

Robustheit

Untersuchungen zur Robustheit des Verfahrens sind erforderlich. Insbesondere die Robustheit gegen eine andere Flughöhe ist wichtig, um zu wissen, ab welchen Abweichungen von der Kartierungsflughöhe ein neues Alphabet angelegt werden muss. Auch die Robustheit bei Vorhandensein von starkem Rauschen ist noch zu klären.

Suche nach beliebigen Sonarsignaturen

Da es sich im Prinzip um ein generisches Sonar-Matching-Verfahren handelt, ist es prinzipiell möglich, nicht nur nach Sonarantworten von generischen Kernen zu suchen, sondern nach bestimmten Objekten. Das ist eine Anforderung, die beispielsweise in der ATR-Community nachgefragt wird. Für genau diesen Zweck entstehen inzwischen spezialisierte Sonarsimulatoren, etwa von Buskenes et al. [Bus14].

11.2.2.2 MRF-Verfahren

Zur Validierung des Verfahrens sind noch umfangreiche Tests nötig. Die generelle Funktionsfähigkeit wurde dargelegt, wobei insbesondere die Wahl von geeigneten Paarknotenfaktoren noch zu untersuchen ist. Auch die Menge der nötigen Beobachtungen und der Einfluss der Strahlform für ein gutes Schätzergebnis muss untersucht werden.

Literaturverzeichnis

- [Ain10] M. Ainslie. *Principles of sonar performance modelling*. Springer, 2010.
- [Als09] T. Alsarayreh und L. Zedel. »Snow Falling on Water, Does it Really Make Noise?« In: *Proceedings of the Underwater Acoustics Measurements Conference UAM 2009*. 2009.
- [And05] A. Andersson. *Range Gated Viewing with Underwater Camera*. Techn. Ber. Linköping University, Department of Electrical Engineering, 2005, S. 72.
- [APL94] APL-UW. *TR 9407, High-Frequency Ocean Environmental Acoustic Models Handbook*. Techn. Ber. Applied Physics Laboratory (APL), University of Washington, Okt. 1994.
- [Aul11a] J. Aulinas, M. Carreras, X. Llado, J. Salvi, R. Garcia, R. Prados und Y. R. Petillot. »Feature extraction for underwater visual SLAM«. In: *Proc. IEEE - Spain OCEANS*. 2011, S. 1–7.
- [Aul11b] J. Aulinas. »Selective Submap Joining SLAM for autonomous vehicles«. Dissertation. Institute of Informatics, Applications, Computer Vision und Robotics Group, Universitat de Girona, 2011.
- [Ayk13] M. Aykin und S. Negahdaripour. »Forward-look 2-D sonar image formation and 3-D reconstruction«. In: *Proc. Oceans - San Diego*. 2013, S. 1–10.
- [Bak13] E. Baker, Y. Beaudoin, S. Bice, L. Burns, D. Dumas, J. Feenan, N. Hanley, P. Hoagland, P. Holland, N. Jobstvogt, H. Lily, M. Lodge, J. Roberts, L. Pendleton, A. Solgaard, P. Symonds, C. Roche und A. Tawake. *Deep Sea Minerals and the Green Economy*. Techn. Ber. Secretariat of the Pacific Community (SPC), United Nations Environment Programme (UNEP), 2013.
- [Bal06] A. Baldacci und G. Haralabus. »Signal processing for an active sonar system suitable for advanced sensor technology applications and environmental adaptation schemes«. In: *European Signal Processing Conference*. 2006.
- [Bar05] C. Barat und M.-J. Rendas. »Exploiting natural contours for automatic sonar-to-video calibration«. In: *Oceans 2005 - Europe*. Bd. 1. Juni 2005, 271–275 Vol. 1.

- [Bar09a] S. Barkby, S. Williams, O. Pizarro und M. Jakuba. »Incorporating prior maps with Bathymetric Distributed Particle SLAM for improved AUV navigation and mapping«. In: *Proc. MTS/IEEE Biloxi - Marine Technology for Our Future: Global and Local Challenges OCEANS 2009*. 2009, S. 1–7.
- [Bar11] S. Barkby, S. Williams, O. Pizarro und M. Jakuba. »Bathymetric SLAM with no map overlap using Gaussian Processes«. In: *Proc. IEEE/RSJ Int Intelligent Robots and Systems (IROS) Conf.* 2011, S. 1242–1248.
- [Bar09b] S. Barkby, S. Williams, O. Pizarro und M. Jakuba. »An efficient approach to bathymetric SLAM«. In: *IROS*. 2009, S. 219–224.
- [Bar97] D. K. Barton. *Radar Technology Encyclopedia (Artech House Radar Library)*. Artech Print on Demand, 1997.
- [Bat15] Bathyswath. *Bathyswath Technical Information. ETD-2002*. Version 9.00. ITER. Aug. 2015.
- [Bea95] R. Beattie und S. Elder. »Side Scan Sonar Image Restoration Using Simulated Annealing and Iterative Conditional Modes«. In: *Proc. Int'l Conf. Sonar Signal Processing*. Loughborough, UK, 1995, S. 161–167.
- [Bea94] R. Beattie und S. Elder. »Sonar image motion distortion estimation and correction using covariance function modelling«. In: *Image and Vision Computing* 12.8 (Okt. 1994), S. 531–535.
- [Bea14a] Y. Beaudoin, S. Dallimore und R. B. (eds.) *Frozen Heat: A UNEP Global Outlook on Methane Gas Hydrates. Volume 2*. Techn. Ber. United Nations Environment Programme UNEP, GRID-Arendal., 2014.
- [Bea14b] Y. Beaudoin, W. Waite, R. Boswell und S. D. (eds.) *Frozen Heat: A UNEP Global Outlook on Methane Gas Hydrates. Volume 1*. Techn. Ber. United Nations Environment Programme UNEP, GRID-Arendal., 2014.
- [Bec08] J. Becker und D. Sandwell. »Global estimates of seafloor slope from single-beam ship soundings«. In: *Journal of Geophysical Research: Oceans* 113.C5 (2008).
- [Bek07] E. Bekir. *Introduction to Modern Navigation Systems*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2007.
- [Bel95] J. Bell. »A Model for the Simulation of Sidescan Sonar«. Dissertation. Heriot-Watt University, Department of Computing und Electrical Engineering, Sep. 1995.

- [Bel99] J. Bell, M. J. Chantler und T. Wittig. »Sidescan sonar: a directional filter of seabed texture?« In: *IEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation* 146.1 (Feb. 1999), S. 65–72.
- [Bel02a] J. Bell, E. Durá, S. Reed, Y. R. Petillot und D. Lane. *Extraction and classification of objects from sidescan sonar*. Techn. Ber. Department of Computing und Electrical Engineering, Heriot-Watt University, Edinburgh, 2002.
- [Bel97] J. Bell und L. M. Linnett. »Simulation and analysis of synthetic sidescan sonar images«. In: *IEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation* 144.4 (Aug. 1997), S. 219–226.
- [Bel06] J. Bell, Y. R. Petillot, K. Lebart, S. Reed, E. Coiras, P. Y. Mignotte und H. Rohou. »Target Recognition in Synthetic Aperture and High Resolution Sidescan Sonar«. In: *Proc. Institution of Engineering and Technology Seminar on High Resolution Imaging and Target Classification*. Nov. 2006, S. 99–106.
- [Bel02b] A. Bellettini und M. Pinto. »Theoretical accuracy of synthetic aperture sonar micronavigation using a displaced phase-center antenna«. In: *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 27.4 (Okt. 2002), S. 780–789.
- [Ber12] D. Bergström. *Random Surface Generator (RSG)*. 2012.
- [Ber84] J. Berkson und J. Matthews. »Statistical characterization of seafloor roughness«. In: *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 9.1 (1984), S. 48–52.
- [Bik08] K. Bikonis, A. Stepnowski und M. Moszynski. »Computer Vision Techniques Applied for Reconstruction of Seafloor 3D Images from Side Scan and Synthetic Aperture Sonars Data«. In: *Journal of the European Acoustics Association (EAA), Acoustics '08 Paris*. Hrsg. von P. D. Botteldooren. Bd. 94. Mai 2008.
- [Bla11] A. Blake, P. Kohli und C. Rother, (Hrsg.). *Markov Random Fields for Vision and Image Processing*. The MIT Press, 2011.
- [Blo09] P. Blondel. *The Handbook of Sidescan Sonar*. Springer Praxis Books. Springer Science+Business Media, LLC New York; Praxis Publishing Ltd, Chichester, UK, 2009.
- [Boe10] N. Boeing. »Ich wette zwei Kisten Rotwein«. German. In: *Technology Review* (Juli 2010). Interview with Peter Herzig (GEOMAR).

- [Boe11] C. Boettcher, T. Knobloch, N.-P. Ruehl, J. Sternheim, U. Wichert und J. Woehler. *Munitionsbelastung der deutschen Meeresgewässer - Bestandsaufnahme und Empfehlungen*. Techn. Ber. Sekretariat Bund/Länder-Messprogramm fuer die Meeresumwelt von Nord- und Ostsee (BLMP) im Bundesamt fuer Seeschifffahrt und Hydrographie, 2011.
- [Bon05] A. Bonci, G. Ippoliti, A. La Manna, S. Longhi und L. Sartini. »Sonar and Video Data Fusion for Robot Localization and Environment Feature Estimation«. In: *Decision and Control, 2005 and 2005 European Control Conference. CDC-ECC '05. 44th IEEE Conference on*. Dez. 2005, S. 8337–8342.
- [Bor05] M. Borowski und P. Forczmański. »Enhanced methods in computer security, biometric and artificial intelligence systems«. In: Hrsg. von J. Pejaś und A. Piegat. London, UK, UK: Springer-Verlag, 2005. Kap. Sonar image simulation by means of ray tracing and image processing, S. 209–214.
- [Bor97] I. Borthwick, F. Balkau, T. Read und J. Monopolis. *Environmental management in oil and gas exploration and production*. Techn. Ber. Oil Industry International Exploration u. a., 1997.
- [Bra08] H. Bracker, E. Krömer und D. Rathjen. »High Fidelity Real-Time Sonar Simulation«. In: *Conference on Undersea Defence Technology (UDT) Europe Conference, Glasgow*. 2008.
- [Bra11] N. Brahim, D. Gueriot, S. Daniel und B. Solaiman. »3D reconstruction of underwater scenes using DIDSON acoustic sonar image sequences through evolutionary algorithms«. In: *OCEANS 2011 IEEE - Spain*. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE), Juni 2011.
- [Bro94] N. Brokloff. »Matrix algorithm for Doppler sonar navigation«. In: *Proc. 'Oceans Engineering for Today's Technology and Tomorrow's Preservation.'* OCEANS '94. Bd. 3. 1994.
- [Bur11] G. Burrowes und J. Y. Khan. »Short-Range Underwater Acoustic Communication Networks«. In: *Autonomous Underwater Vehicles*. Hrsg. von N. A. Cruz. ISBN: 978-953-307-432-0. InTech, 2011, S. 173–198.
- [Bus14] J. Buskenes, J. P. Åsen, H. Midelfart und Ø. Midtgaard. »A GPU Simulator for Automatic Target Recognition«. In: *Proceedings of the 2nd Underwater Acoustics Conference 2014, Rhodes*. 2014.

- [Cai13] A. Caiti, V. Calabro, T. Fabbri, D. Fenucci und A. Munafo. »Under-water communication and distributed localization of AUV teams«. In: *OCEANS - Bergen, 2013 MTS/IEEE*. Juni 2013, S. 1–8.
- [Cal03a] B. Calder und L. Mayer. »Automatic processing of high-rate, high-density multibeam echosounder data«. In: *Geochemistry Geophysics Geosystems G3* 4.6 (Juni 2003). American Geophysical Union.
- [Cal11] B. Calder und G. Rice. »Design and implementation of an extensible variable resolution bathymetric estimator«. In: *Proc. US Hydro. Conf. Hydro. Soc. Am.* 2011.
- [Cal03b] H. Callow. »Signal Processing for Synthetic Aperture Sonar Image Enhancement«. Dissertation. University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, Apr. 2003.
- [Cap08] C. G. Capus, A. C. Banks, E. Coiras, I. T. Ruiz, C. J. Smith und Y. R. Petillot. »Data correction for visualisation and classification of side-scan SONAR imagery«. In: *IET Radar, Sonar Navigation* 2.3 (Juni 2008), S. 155–169.
- [Car10] D. Caress. *Some Comments on the Signal Processing Used By Chirp Subbottom Profilers*. Monterey Bay Aquarium Research Institute. 2010. URL: <http://www.mbari.org/data/mbsystem/sonarfunction/SubbottomProcessing/subbottomdataprocessing.html>.
- [Car98] R. N. Carpenter. »Concurrent mapping and localization with FLS«. In: *Proc. Of The 1998 Workshop AUV'98 Autonomous Underwater Vehicles*. 1998, S. 133–148.
- [Car09] L. Carter, D. Burnett, S. Drew, G. Marle, L. Hagadorn, D. Bartlett-McNeil und N. Irvine. *Submarine cables and the oceans: connecting the world*. Techn. Ber. Biodiversity Series No. 31. ISBN 978-0-9563387-2-3. International Cable Protection Committee Ltd (ICPC) und United Nations Environment Programme World Conservation Monitoring Centre (UNEP-WCMC), 2009.
- [Cha86] P. Chavez. »Processing Techniques for Digital Sonar Images from GLORIA«. In: *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* AP8, Aug (1986), S. 1133.
- [Che14] E. Chen und J. Guo. »Real Time Map Generation using Sidescan Sonar Scanlines for Unmanned Underwater Vehicles«. In: *Ocean* (2014).
- [Cla07] D. Clark, I. T. Ruiz, Y. Petillot und J. Bell. »Particle PHD filter multiple target tracking in sonar image«. In: *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 43.1 (Jan. 2007), S. 409–416.

- [Cla13a] M. Clark, D. Desbruyères, C. Fisher, R. Heydon, J. Hein, S. Petersen, A. Rowden, S. Smith, E. Baker und Y. Beaudoin. *Sea-Floor Massive Sulphides – A physical, biological, environmental, and technical review*. Techn. Ber. Secretariat of the Pacific Community (SPC), United Nations Environment Programme (UNEP), 2013.
- [Cla13b] M. Clark, R. Heydon, J. Hein, S. Petersen, A. Rowden, S. Smith, E. Baker und Y. Beaudoin. *Cobalt-rich Ferromanganese Crusts – A physical, biological, environmental, and technical review*. Techn. Ber. Secretariat of the Pacific Community (SPC), United Nations Environment Programme (UNEP), 2013.
- [Cla13c] M. Clark, R. Heydon, J. Hein, S. Smith, C. Smith, S. Petersen, E. Baker und Y. Beaudoin. *Manganese Nodules – A physical, biological, environmental, and technical review*. Techn. Ber. Secretariat of the Pacific Community (SPC), United Nations Environment Programme (UNEP), 2013.
- [Cla97] J. Clarke. *Are you really getting full bottom coverage*. Techn. Ber. Ocean Mapping Group, UNB, 1997.
- [Cli05] Clive Anderson (Stolt Offshore). *Pipeline Inspection*. Hydrofest 2005. The Hydrographic Society UK. Apr. 2005. URL: http://www.ths.org.uk/documents/ths.org.uk/downloads/2005-04-05-hydrofest-7_pipeline_inspection.pdf.
- [Cob90] D. Cobra. »Estimation and correction of geometric distortions in side-scan sonar images«. Dissertation. Joint Program in Oceanography, Oceanographic Engineering of the Massachusetts Institute of Technology (MIT) und the Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI), Mai 1990.
- [Cob92] D. Cobra, A. Oppenheim und J. Jaffe. »Geometric distortions in side-scan sonar images: a procedure for their estimation and correction«. In: *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 17.3 (1992), S. 252–268.
- [Coi09a] E. Coiras und J. Groen. »3D Target Shape From SAS Images Based on a Deformable Mesh«. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Underwater Acoustic Measurements (UAM), Nafplion, Greece*. 2009.
- [Coi09b] E. Coiras und J. Groen. »Simulation and 3D Reconstruction of Side-looking Sonar Images«. In: *Advances in Sonar Technology*. Hrsg. von S. R. Silva. ISBN: 978-3-902613-48-6. <http://www.intechweb.org/>: INTECH, 2009.

- [Coi07] E. Coiras, Y. Petillot und D. Lane. »Multiresolution 3-D Reconstruction From Side-Scan Sonar Images«. In: *IEEE Transactions on Image Processing* 16.2 (Feb. 2007). Heriot-Watt University Edinburgh, S. 382–390.
- [Coi09c] E. Coiras, A. Ramirez-Montesinos und J. Groen. »GPU-based simulation of side-looking sonar images«. In: *OCEANS 2009 - EUROPE*. Mai 2009, S. 1–6.
- [Coi04] E. Coiras, I. Ruiz, Y. Petillot und D. Lane. »Fusion of multiple side-scan sonar views«. In: *Proceedings of the OCEANS '04. MTS/IEEE*. Bd. 4. Nov. 2004, S. 2036–2054.
- [Cru99] L. A. Crum, H. C. Pumphrey, R. A. Roy und A. Prosperetti. »The underwater sounds produced by impacting snowflakes«. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 106.4 (1999), S. 1765–1770.
- [Cum09] M. Cummins. »Probabilistic Localization and Mapping in Appearance Space«. Dissertation. University of Oxford, 2009.
- [Cus90] J. Cuschieri und M. Hebert. »Three-Dimensional Map Generation From Side-Scan Sonar Images«. In: *Journal of Energy Resources Technology* 112 (Juni 1990), S. 96–102.
- [Dan98] S. Daniel, F. Le Leannec, C. Roux, B. Soliman und E. Maillard. »Side-scan sonar image matching«. In: *Oceanic Engineering, IEEE Journal of* 23.3 (Juli 1998), S. 245–259.
- [DEG06] DEGA. *DEGA-Empfehlung 101: Akustische Wellen und Felder*. Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (DEGA). 2006. URL: <http://www.dega-akustik.de/publikationen/dega-empfehlung-101>.
- [Dek12] S. Dektor und S. Rock. »Improving robustness of terrain-relative navigation for AUVs in regions with flat terrain«. In: *Proc. IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (AUV)*. 2012, S. 1–7.
- [DeR13] S. L. DeRuiter, B. L. Southall, J. Calambokidis, W. M. X. Zimmer, D. Sadykova, E. A. Falcone, A. S. Friedlaender, J. E. Joseph, D. Moretti, G. S. Schorr, L. Thomas und P. L. Tyack. »First direct measurements of behavioural responses by Cuvier's beaked whales to mid-frequency active sonar«. In: *Biology Letters* 9.4 (Mai 2013), S. 20130223–20130223.
- [Don13] H. Dong und R. Chapman. »Measurement Of Ocean Bottom Reflectivity With A Horizontal Line Array«. In: *Proceedings of the 1st International Conference on Underwater Acoustics (UAC), Corfu, Greece*. 2013.

- [Dos06] S. Dosso und C. Holland. »Bayesian inversion of seabed reflection data«. In: *Acoustic Sensing Techniques for the Shallow Water Environment*. Springer Science + Business Media, 2006, S. 17–27.
- [Dur04] E. Durá, J. Bell und D. Lane. »Reconstruction of textured seafloors from side-scan sonar images«. In: *IEE Proceedings – Radar, Sonar and Navigation* 151.2 (Apr. 2004), S. 114–126.
- [Dur06a] H. Durrant-Whyte und T. Bailey. »Simultaneous localization and mapping: Part I«. In: *IEEE Robotics & Automation Magazine* 13 (2 Juni 2006).
- [Dur06b] H. Durrant-Whyte und T. Bailey. »Simultaneous localization and mapping: Part II«. In: *IEEE Robotics & Automation Magazine* 13 (3 Sep. 2006).
- [Dus98] B. D. Dushaw und J. A. Colosi. *Ray tracing for ocean acoustic tomography*. Techn. Ber. DTIC Document, 1998.
- [Ehr15] M. Ehrhardt, F. Becker, F. Motzki, D. Speicher und C. Degel. »Concept for a high-resolution real-time capable 3D sonar camera for deep sea operation«. In: *Proceedings of the 3rd Underwater Acoustics Conference and Exhibition (UACE) 2015, Crete*. 2015.
- [Els04] G. Elston und J. Bell. »Pseudospectral time-domain modeling of non-Rayleigh reverberation: synthesis and statistical analysis of a sidescan sonar image of sand ripples«. In: *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 29.2 (2004), S. 317–329.
- [Eng08] R. Engel, U. Hölscher-Höbing und K. Siantidis. »A solution to Simultaneous Localisation and Mapping with a side looking sonar«. In: *Conference on Undersea Defence Technology (UDT) Europe Conference, Glasgow*. 2008.
- [Ett13] P. Etter. *Underwater Acoustic Modeling and Simulation*. 4th. Spon Press, Taylor&Francis Group, 2013.
- [Fab11] J. Fabres, Ø. Halvorsen, Ø. Lønne, J.-N. Poussart, R. P. (Cartography), M. Sørensen, K. Thygesen, T. Schoolmeester und E. Baker. *Continental Shelf - The Last Maritime Zone*. Techn. Ber. UNEP/GRID-Arendal, 2011.
- [Fai08] N. Fairfield und D. Wettergreen. »Active localization on the ocean floor with multibeam sonar«. In: *Proc. OCEANS 2008*. 2008, S. 1–10.
- [Fai09] N. Fairfield. »Localization, Mapping, and Planning in 3D Environments«. Dissertation. Pittsburgh, PA: Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Jan. 2009.

- [Fai07] N. Fairfield, G. A. Kantor und D. Wettergreen. »Real-Time SLAM with Octree Evidence Grids for Exploration in Underwater Tunnels«. In: *Journal of Field Robotics* 24.1-2 (2007). Hrsg. von P. Newman, S. 03–21.
- [Fai05] N. Fairfield, G. A. Kantor und D. Wettergreen. »Three Dimensional Evidence Grids for SLAM in Complex Underwater Environments«. In: *Proceedings of the 14th International Symposium of Unmanned Untethered Submersible Technology (UUST)*. Lee, New Hampshire: AUSI, Aug. 2005.
- [Fai06] N. Fairfield, G. A. Kantor und D. Wettergreen. »Towards Particle Filter SLAM with Three Dimensional Evidence Grids in a Flooded Subterranean Environment«. In: *Proceedings of ICRA 2006*. Mai 2006, S. 3575–3580.
- [Fak13] E. Fakiris, D. P. Williams, M. Couillard und W. Fox. »Sea-Floor Acoustic Anisotropy And Complexity Assessment Towards Prediction Of ATR Performance«. In: *Proceedings of the 1st International Conference on Underwater Acoustics (UAC), Corfu, Greece*. 2013.
- [Fal13a] M. F. Fallon, J. Folkesson, H. McClelland und J. J. Leonard. »Relocating Underwater Features Autonomously Using Sonar-Based SLAM«. In: *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 38.38 (3 Apr. 2013).
- [Fal13b] M. F. Fallon, H. Johannsson, M. Kaess, J. Folkesson, H. McClelland, B. J. Englot, F. S. Hover und J. J. Leonard. »Simultaneous Localization and Mapping in Marine Environments«. In: *Marine Robot Autonomy*. Hrsg. von M. Seto. Springer, 2013.
- [Fal11] M. F. Fallon, M. Kaess, H. Johannsson und J. J. Leonard. »Efficient AUV navigation fusing acoustic ranging and side-scan sonar«. In: *Proc. IEEE Int Robotics and Automation (ICRA) Conf.* 2011, S. 2398–2405.
- [Fau07a] K. M. Fauske, F. Gustafsson und O. Hegrenaes. »Estimation of AUV dynamics for sensor fusion«. In: *Proc. 10th Int Information Fusion Conf.* 2007, S. 1–6.
- [Fau07b] K. Fauske, F. Gustafsson und O. Herenaes. »Estimation of AUV dynamics for sensor fusion«. In: *Fusion*. März 2007.
- [Fil14] L. Fillinger, A. Hunter und M. Clarijs. »Passive sonar denoising for diver detection in presence of snapping shrimp«. In: *Proceedings of the 2nd International Conference and Exhibition on Underwater Acoustics, Rhodes*. 2014.
- [Fis99] T. Fisher. *Interactive Digital Filter Design*. Okt. 1999.

- [Fla11] P. Flandrin. „Chirps“ *everywhere*. IEEE Signal Processing Society, 2011-2012. CNRS & École Normale Supérieure de Lyon, France, 2011.
- [Fle12] W. Flentje, S. E. Lee, A. Virnovskaia, S. Wang und S. Zabeen. »Polymetallic nodule mining: innovative concepts for commercialisation«. In: (2012).
- [Fol07] J. Folkesson, J. Leonard, J. Leederkerken und R. Williams. »Feature tracking for underwater navigation using sonar«. In: *Intelligent Robots and Systems, 2007. IROS 2007. IEEE/RSJ International Conference on* (Okt. 2007), S. 3678–3684.
- [Fox85] C. G. Fox und D. E. Hayes. »Quantitative methods for analyzing the roughness of the seafloor«. In: *Reviews of Geophysics* 23.1 (1985), S. 1–48.
- [Gad98] K. Gade und B. Jalving. »An aided navigation post processing filter for detailed seabed mapping UUVs«. In: *Proc. Of The 1998 Workshop on AUV'98 Autonomous Underwater Vehicles*. Aug. 1998, S. 19–25.
- [Gad04] K. Gade. »NavLab, a Generic Simulation and Post-processing Tool for Navigation«. In: *European Journal of Navigation* 2.4 (Nov. 2004). Norwegian Defence Research Establishment (FFI), S. 1–9.
- [Gag06] J.-S. Gagnon, S. Lovejoy und D. Schertzer. »Multifractal earth topography«. In: *Nonlinear Processes in Geophysics* 13.5 (2006), S. 541–570.
- [Gau02] R. C. Gauss, R. F. Gragg, D. Wurmser, J. M. Fialkowski und R. W. Nero. *Broadband models for predicting bistatic bottom, surface and volume scattering strengths*. Techn. Ber. NRL/FR/7100–02-10,042. Washington, DC 20375-5320: Naval Research Laboratory, 2002.
- [Gau04] S. Gautier und D. Gibert. »Scattering from a fractal surface – acoustical experiments and comparison with near-nadir models«. In: *Icarus* 167.2 (2004), S. 453–463.
- [GEB08] GEBCO. *The GEBCO_2008 one minute grid, version 20141103. General Bathymetric Chart of the Oceans*. 30 arcsec grid. 2008.
- [GEB14] GEBCO. *The GEBCO_2014 30 arc-second grid, version 20150318. General Bathymetric Chart of the Oceans*. 30 arcsec grid. 2014.
- [Gen10] Y. Geng, R. Martins und J. Sousa. »Accuracy analysis of DVL/IMU/-magnetometer integrated navigation system using different IMUs in AUV«. In: *Control and Automation (ICCA), 2010 8th IEEE International Conference on*. 2010, S. 516–521.

- [Geo95] O. George und R. Bahl. »Simulation of backscattering of high frequency sound from complex objects and sand sea-bottom«. In: *Oceanic Engineering, IEEE Journal of* 20.2 (Apr. 1995), S. 119–130.
- [Gol13] J. A. Goldbogen, B. L. Southall, S. L. DeRuiter, J. Calambokidis, A. S. Friedlaender, E. L. Hazen, E. A. Falcone, G. S. Schorr, A. Douglas, D. J. Moretti, C. Kyburg, M. F. McKenna und P. L. Tyack. »Blue whales respond to simulated mid-frequency military sonar«. In: *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 280.1765 (Juni 2013), S. 20130657–20130657.
- [Gos04] C. Gostnell. *Efficacy of an interferometric sonar for hydrographic surveying*. Techn. Ber. NOAA's National Ocean Service, Office of Coast Survey, Hydrographic Surveys Division, 2004.
- [Gra13] B. Graham, W. Reilly, F. Beinecke, D. Boesch, T. Garcia, C. Murray und F. Ulmer. *Assessing Progress - Three Years Later*. Techn. Ber. Oil Spill Commission Action, Apr. 2013.
- [Gra14] B. Graham, W. Reilly, F. Beinecke, D. Boesch, T. Garcia, C. Murray und F. Ulmer. *The Bp Gulf Oil Spill - Four Years Later*. Techn. Ber. Oil Spill Commission Action, Apr. 2014.
- [Gri06] S. Griffin, S. Kuhn und K. Benjamin. »Parametric Sub-Bottom Profiler For AUVs«. In: *Sea Technology* 46 (7 Juli 2006), S. 31–36.
- [Gro06] J. Groen. »Adaptive motion compensation in sonar array processing«. Dissertation. TU Delft, 2006.
- [Gro72] V. D. Grosso und C. Mader. »Speed of sound in pure water«. In: *the Journal of the Acoustical Society of America* 52.5B (1972), S. 1442–1446.
- [Gro08] P. D. Groves. *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*. Artech House GNSS Technology and Applications Series. Artech House, Boston, London, 2008.
- [Gué11] D. Guériot und C. Sintès. *Sonar Data Simulation*. INTECH Open Access Publisher, 2011.
- [Gut02] M. Gutowski, J. Bull, T. Henstock, J. Dix, P. Hogarth, T. Leighton und P. White. »Chirp sub-bottom profiler source signature design and field testing«. In: *Marine Geophysical Researches* 23.5-6 (2002), S. 481–492.
- [Had10] R. Hadsell, J. A. (Bagnell, D. Huber und M. Hebert. »Space-carving Kernels for Accurate Rough Terrain Estimation«. In: *International Journal of Robotics Research* 29.1 (Juli 2010).

- [Hag07] P. Hagen, O. Midtgaard und O. Hasvold. »Making AUVs Truly Autonomous«. In: *OCEANS 2007*. Sep. 2007, S. 1–4.
- [Hal14] P. Halbach und A. Jahn. *Metalle aus der Tiefsee – Aussichtsreiche Option oder Illusion?* Techn. Ber. FU Berlin, 2014.
- [Ham14] M. Hammond und S. Rock. »A SLAM-based approach for underwater mapping using AUVs with poor inertial information«. In: *Proc. IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (AUV)*. 2014, S. 1–8.
- [Han98] R. Hansen und P. Andersen. »The application of real time 3D acoustical imaging«. In: *OCEANS '98 Conference Proceedings*. Bd. 2. Sep. 1998, 738–741 vol.2.
- [Han11] R. E. Hansen. »Introduction to Synthetic Aperture Sonar«. In: *Sonar Systems*. Hrsg. von P. N. Kolev. InTech, 2011.
- [Har88] C. Harris und M. Stephens. »A Combined Corner and Edge Detector«. In: *The Fourth Alvey Vision Conference*. Manchester, 1988, S. 147–151.
- [Hat09] J. Hatzky. *Analyse von Bathymetrie und akustischer Rückstreuung verschiedener Fächersonar- und Sedimentecholot-Systeme zur Charakterisierung und Klassifizierung des Meeresbodens am Gakkel-Rücken, Arktischer Ozean. Analysis of bathymetry and acoustic backscatter from different multibeam sonar and sediment echosounder systems for the characterisation and classification of the seafloor at the Gakkel ridge, Arctic ocean*. Bremerhaven, 2009.
- [Hay08] M. Hayes. »Volumetric InSAS reconstruction using belief propagation«. In: *Image and Vision Computing New Zealand, 2008. IVCNZ 2008. 23rd International Conference*. 2008, S. 1–6.
- [He09] B. He, K. Yang, S. Zhao und Y. Wang. »Underwater simultaneous localization and mapping based on EKF and point features«. In: *Mechatronics and Automation, 2009. ICMA 2009. International Conference on* (Aug. 2009), S. 4845–4850.
- [Heg08] Ø. Hegrenæs, E. Berglund und O. Hallingstad. »Model-aided inertial navigation for underwater vehicles«. In: *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation ICRA 2008*. 2008, S. 1069–1076.
- [Heg11] Ø. Hegrenæs und O. Hallingstad. »Model-Aided INS With Sea Current Estimation for Robust Underwater Navigation«. In: *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 36.2 (2011), S. 316–337.

- [Heg07] Ø. Hegrenæs, O. Hallingstad und B. Jalving. »Comparison of Mathematical Models for the HUGIN 4500 AUV Based on Experimental Data«. In: *Proc. Symp. Underwater Technology and Workshop Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies*. 2007, S. 558–567.
- [Hei03a] A. Hein. *Processing of SAR data - Fundamentals, Signal Processing, Interferometry*. Springer, 2003.
- [Hei02a] J. R. Hein, P. Herzig, S. Petersen, M. Hannington und S. Juniper. *Polymetallic massive sulphides and cobalt-rich ferromanganese crusts; status and prospects, Technical Study No 2*. Techn. Ber. International Seabed Authority (ISA), 2002.
- [Hei03b] J. R. Hein, A. Koschinsky und A. N. Halliday. »Global occurrence of tellurium-rich ferromanganese crusts and a model for the enrichment of tellurium«. In: *Geochimica et Cosmochimica Acta* 67.6 (März 2003), S. 1117–1127.
- [Hei02b] G. Heinzl, A. Rüdiger und R. Schilling. *Spectrum and spectral density estimation by the Discrete Fourier transform (DFT), including a comprehensive list of window functions and some new at-top windows*. 2002.
- [Hen06] P. Henkart. »Chirp Subbottom Profiler Processing - A Review«. In: *Sea Technology* (Okt. 2006). Scripps Institution of Oceanography, S. 35–38.
- [Hod10] R. P. Hodges. *Underwater Acoustics Analysis, Design and Performance of Sonar*. Sonalysts, Inc. John Wiley & Sons, Ltd, 2010.
- [Hoe10] U. Hoelscher-Hoebing und D. Kraus. »Multi Beam/Multi Aspect Image Data Fusion for Side Scan Sonars«. In: *Synthetic Aperture Radar (EUSAR), 2010 8th European Conference on*. Juni 2010, S. 1–4.
- [Hof14] G. Hoffmann-Wieck, U. Schulte-Rahde, F. Lehmhaus, J. Schimmler und I. Klauke. *100 Jahre Echolot. Die Tiefe hören. 4000 Jahre Tiefenmessung im Ozean*. Hrsg. von GEOMAR. 2014.
- [Hun02] A. Hunter, M. Hayes und P. Gough. »Using A Faceted Rough Surface Environmental Model to Simulate Shallow-Water SAS Imagery«. In: *Impact of Littoral Environmental Variability on Acoustic Predictions and Sonar Performance*. Springer, 2002, S. 481–488.
- [Hun06] A. Hunter. »Underwater Acoustic Modelling for Synthetic Aperture Sonar«. Dissertation. Dept. Electrical und Computer Engineering, University of Canterbury, New Zealand, Juni 2006.

- [Hur10] N. Hurtós, X. Cufí und J. Salvi. »Calibration of optical camera coupled to acoustic multibeam for underwater 3D scene reconstruction«. In: *OCEANS 2010 IEEE - Sydney*. Mai 2010, S. 1–7.
- [Hur12] N. Hurtós, X. Cufí, Y. R. Petillot und J. Salvi. »Fourier-based registrations for two-dimensional forward-looking sonar image mosaicing«. In: *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2012, Vilamoura, Algarve, Portugal*. Okt. 2012, S. 5298–5305.
- [Int03] International Seabed Authority. *Polymetallic Nodules*. 2003.
- [Jac07] D. R. Jackson und M. D. Richardson. *High-Frequency Seafloor Acoustics*. Monograph series in underwater acoustics. Springer, 2007.
- [Jac86] D. Jackson, D. Winebrenner und A. Ishimaru. »Application of the composite roughness model to high-frequency bottom backscattering«. In: *Journal of the Acoustical Society of America* 79.5 (1986), S. 1410–1422.
- [Jac14] M. Jacobi und D. Karimanzira. »Multi sensor underwater pipeline tracking with AUVs«. In: *Oceans - St. John's, 2014*. Sep. 2014, S. 1–6.
- [Jac15] M. Jacobi. »Autonomous inspection of underwater structures«. In: *Robotics and Autonomous Systems* 67 (2015), S. 80–86.
- [Jak10a] W. Jakob. *Mitsuba renderer*. 2010.
- [Jak10b] M. Jakuba, O. Pizarro und S. Williams. »High resolution, consistent navigation and 3D optical reconstructions from AUVs using magnetic compasses and pressure-based depth sensors«. In: *Proceedings of MTS/IEEE OCEANS 2010, Sydney, Australia*. 2010.
- [Jen11] F. B. Jensen, W. A. Kuperman, M. B. Porter und H. Schmidt. *Computational Ocean Acoustics*. Hrsg. von W. M. Hartmann. 2nd. Springer Science+Business Media, LLC New York, 2011.
- [Joh90] H. Johnson und M. Helferty. »The geological interpretation of side-scan sonar«. In: *Reviews of Geophysics* 28.4 (Nov. 1990), S. 357–380.
- [Joh10] M. Johnson-Roberson, O. Pizarro, S. Williams und I. Mahon. »Generation and visualization of large-scale three-dimensional reconstructions from underwater robotic surveys«. In: *Journal of Field Robotics* 27.1 (2010), S. 21–51.
- [Joh14] G. Johnston. *Deep Water Acoustic Positioning*. Techn. Ber. IMCA M 200 Rev. 1, IMCA S 013 Rev. 1. International Marine Contractors Association (IMCA), 2014.

- [Kae08] M. Kaess, A. Ranganathan und F. Dellaert. »iSAM: Incremental Smoothing and Mapping«. In: *IEEE Transactions on Robotics* 24.6 (2008), S. 1365–1378.
- [Kan07] G. A. Kantor, N. Fairfield, D. Jonak und D. Wettergreen. »Experiments in Navigation and Mapping with a Hovering AUV«. In: *Intl. Conf. on Field and Service Robotics*. 2007.
- [Kas12] J. E. Kassah. »Development of biofouling on salmon cage nets and the effects of anti-fouling treatments on the survival of the hydroid (Ectopleura larynx)«. Masterarbeit. Norwegian University of Science and Technology, Department of Biology, 2012.
- [Kim13] A. Kim und R. Eustice. »Perception-driven navigation: Active visual SLAM for robotic area coverage«. In: *Proc. IEEE Int Robotics and Automation (ICRA) Conf.* 2013, S. 3196–3203.
- [Kim10] B.-N. Kim, J. Hahn, B. K. Choi und B.-C. Kim. »Snapping Shrimp Sound Measured Under Laboratory Conditions«. In: *Japanese Journal of Applied Physics* 49.7S (2010), 07HG04.
- [Kin06] J. Kinsey, R. Eustice und L. Whitcomb. »A survey of underwater vehicle navigation: Recent advances and new challenges«. In: *Proceedings of IFAC Conference of Manoeuvring and Control of Marine Craft*. 2006.
- [Köh13] D. Köhntopp, B. Lehmann und D. Kraus. »Computational Efficient Object Detection Exploiting Advanced Templates«. In: *Proceedings of the 1st International Conference on Underwater Acoustics (UAC), Corfu, Greece*. 2013.
- [Kol09] D. Koller und N. Friedman. *Probabilistic Graphical Models: Principles and Techniques (Adaptive Computation and Machine Learning series)*. The MIT Press, 2009.
- [Kra98] P. H. Kraeutner. »Small aperture acoustic imaging using model based array signal processing«. Dissertation. Simon Fraser University, 1998.
- [Kra00] P. Kraeutner und J. Bird. *Imaging methods and apparatus using model-based array signal processing*. US Patent 6,130,641. Okt. 2000.
- [Kra10] D. Kraus und R. M. Lemor. »High Frequency 3D-Sonar Imaging for the Inspection of Underwater Constructions«. In: *Synthetic Aperture Radar (EUSAR), 2010 8th European Conference on*. Juni 2010, S. 1–4.
- [Kra13] P. D.-I. D. Kraus. *Lecture notes: Underwater Acoustics and Sonar Signal Processing*. Techn. Ber. Institute of Water-Acoustics, Sonar-Engineering und Signal-Theory (IWSS), Uni Bremen, 2013.

- [Kro11] D. W. Krout, G. Okopal und E. Hanusa. »Video Data and Sonar Data: Real World Data Fusion Example«. In: *Information Fusion (FUSION), 2011 Proceedings of the 14th International Conference on*. Juli 2011, S. 1–5.
- [Kut06] H. Kuttruff. *Acoustics: An Introduction*. CRC Press, 2006.
- [Laa09] H. Laanaya und A. Martin. »Multi-view fusion based on belief functions for seabed recognition«. In: *Information Fusion, 2009. FUSION '09. 12th International Conference on*. Juli 2009, S. 195–202.
- [Lal97] C. Lalli und T. Parsons. *Biological oceanography: an introduction*. Open University oceanography series. Elsevier Butterworth-Heinemann, 1997.
- [Lam04] P. Lam und J. P. Cowen. »Processing Deep-Sea Particle-Rich Water Samples for Fluorescence In Situ Hybridization: Consideration of Storage Effects, Preservation, and Sonication«. In: *Applied and Environmental Microbiology* 70.1 (Jan. 2004), S. 25–33.
- [Lan91] D. Langer und M. Hebert. »Building Qualitative Elevation Maps From Side Scan Sonar Data For Autonomous Underwater Navigation«. In: *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Apr. 1991, S. 2478–2483.
- [Lan09] F. Langner, C. Knauer, W. Jans und A. Ebert. »Side scan sonar image resolution and automatic object detection, classification and identification«. In: *OCEANS 2009 - EUROPE*. Mai 2009, S. 1–8.
- [Lar00] M. Larsen. »High performance Doppler-inertial navigation-experimental results«. In: *Proc. OCEANS 2000 MTS/IEEE Conf. and Exhibition*. Bd. 2. 2000, S. 1449–1456.
- [Leh14] J. Lehmköster, T. Schröder, E. Lange, S. Petersen, L. Rüpke, E. Söding und K. Wallmann. *World Ocean Review 3: Marine Resources – Opportunities and Risks*. Techn. Ber. maribus gGmbH, 2014.
- [Lei14] S. Leier. »Signal Processing Techniques for Seafloor Ground-Range Imaging Using Synthetic Aperture Sonar Systems«. Dissertation, TU Darmstadt, Aug. 2014.
- [Ler09] R. Lerch, G. Sessler und D. Wolf. *Technische Akustik*. Springer Science + Business Media, 2009.
- [Li12] P. Q. Li. *Digital Sonar Design in Underwater Acoustics - Principles and Applications*. Springer Berlin Heidelberg, 2012.

- [Li91] R. Li und S. Pai. »Improvement Of Bathymetric Data Bases By Shape From Shading Technique Using Side-scan Sonar Images«. In: *Proc. 'Ocean Technologies and Opportunities in the Pacific for the 90's' OCEANS '91*. Bd. 1. Okt. 1991, S. 320–324.
- [Lin91] L. Linnett. »Multi-texture image segmentation«. Dissertation. Computing und Electrical Engineering, Heriot-Watt University, 1991.
- [Liu98] Q. H. Liu. »The pseudospectral time-domain (PSTD) algorithm for acoustic waves in absorptive media«. In: *Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, IEEE Transactions on* 45.4 (Juli 1998), S. 1044–1055.
- [Liu11] S. Liu. »Statistical Inverse Ray Tracing for Image-Based 3-d Modeling«. Dissertation. Providence, Rhode Island: School of Engineering at Brown University, Mai 2011.
- [Liu10] S. Liu und D. B. Cooper. »Ray Markov Random Fields for image-based 3D modeling: Model and efficient inference«. In: *Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2010, S. 1530–1537.
- [Liu14] S. Liu und D. Cooper. »Statistical Inverse Ray Tracing for Image-Based 3D Modeling«. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 36.10 (2014), S. 2074–2088.
- [Loc04] D. Lockhart, E. Saade und J. Wilson. *New Developments in Multi-beam Backscatter Data Collection and Processing*. Techn. Ber. Fugro Pelagos, Inc., 2004.
- [Loe04] H.-A. Loeliger. »An Introduction to factor graphs«. In: *IEEE Signal Process. Mag.* 21.1 (Jan. 2004), S. 28–41.
- [Lor09] A. Lorenson und D. Kraus. »3D-Sonar image formation and shape recognition techniques«. In: *OCEANS 2009-EUROPE*. IEEE. 2009, S. 1–6.
- [Lu02] Y. Lu und M. Oshima. »On the 3-D Reconstruction of Seabed Using Multiple Sidescan Sonar Images«. In: *MVA*. 2002, S. 584–587.
- [Luc81] B. D. Lucas und T. Kanade. »An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision (IJCAI)«. In: *Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI '81)*. Apr. 1981, S. 674–679.
- [Luo10] J. Luo, B. He, P. Wang, K. Yang und C. Ren. »Data Association for AUV Localization and Map Building«. In: *Proc. Int Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA) Conf.* Bd. 1. 2010, S. 886–889.

- [Lur10] X. Lurton. *An Introduction to Underwater Acoustics: Principles and Applications, 2nd Edition*. Springer Praxis Books / Geophysical Sciences. Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [Lyo91] A. P. Lyons. *Modeling acoustic backscatter from the seafloor by long-range side-scan sonar*. Techn. Ber. DTIC Document, 1991.
- [Lyo02] A. Lyons, W. Fox, T. Hasiotis und E. Pouliquen. »Characterization of the two-dimensional roughness of wave-rippled sea floors using digital photogrammetry«. In: *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 27.3 (2002), S. 515–524.
- [Mac15] E. Maccioni, N. Beverini, M. Calamai, L. Bancallari, M. Morganti und S. Firpi. »Optical fibre hydrophones for navigation systems«. In: *OCEANS 2015 - Genova*. Mai 2015, S. 1–4.
- [Mac81] K. Mackenzie. »Nine-term equation for sound speed in the oceans«. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 70.3 (1981), S. 807–812.
- [Mad15] C. Madsen. *Reforms since the Deepwater Horizon Tragedy*. 2015.
- [Mah04] I. Mahon und S. Williams. »SLAM using natural features in an underwater environment«. In: *Control, Automation, Robotics and Vision Conference, 2004. ICARCV 2004 8th 3* (Dez. 2004), 2076–2081 Vol. 3.
- [Maj01] S. Majumder, S. Scheduling und H. Durrant-Whyte. »Multisensor data fusion for underwater navigation«. In: *Robotics and Autonomous Systems* 35.2 (2001), S. 97–108.
- [Mal10] A. Mallios, P. Ridao, D. Ribas und E. Hernández. »Probabilistic Sonar Scan Matching SLAM for Underwater Environment«. In: *Proceedings of the Oceans IEEE*. Sydney, Australia, Mai 2010.
- [Man01] M. Mandt, K. Gade und B. Jalving. *Integrating DGPS-USBL position measurements with inertial navigation in the HUGIN 3000 AUV*. Techn. Ber. Forsvarets Forskningsinstitut (Norwegian Defence Research Establishment), 2001.
- [Mar10] G. Marani und S. Choi. »Underwater Target Localization«. In: *IEEE Robotics & Automation Magazine* 17.1 (März 2010), S. 64–70.
- [Mar15] F. Martignac, A. Daroux, J.-L. Bagliniere, D. Ombredane und J. Guillard. »The use of acoustic cameras in shallow waters: new hydroacoustic tools for monitoring migratory fish population. A review of DIDSON technology«. In: *Fish and Fisheries* 16.3 (2015), S. 486–510.
- [Mar12] G. D. Martino, A. Iodice, D. Riccio und G. Ruello. »Physical models for SAR speckle simulation«. In: *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2012 IEEE International*. 2012, S. 5782–5785.

- [Mas08] D. Massonnet und J.-C. Souyris. *Imaging with Synthetic Aperture Radar (Engineering Sciences: Electrical Engineering)*. EFPL Press, 2008.
- [Mau14] F. Maurelli. »Probabilistic Approaches for Intelligent AUV Localisation«. PhD dissertation. Edinburgh, Scotland, UK: Heriot-Watt University, 2014.
- [McL96] N. McLaren und C. Kuo. »Geometrical aspects of a sonar-based navigation system for underwater vehicles«. In: *Ocean Engineering* 23.2 (1996), S. 201–217.
- [Med11] D. Meduna. »Terrain relative navigation for sensor-limited systems with application to underwater vehicles«. PhD. Stanford University, Dept. of Aeronautics & Astronautics, Aug. 2011, S. 183.
- [Mel87] R. Mellen, P. Scheifele und D. Browning. *Global model for sound absorption in sea water*. Techn. Ber. DTIC Document, 1987.
- [Min01] D. A. Mindell und B. Bingham. »A high-frequency, narrow-beam sub bottom profiler for archaeological applications«. In: *OCEANS, 2001. MTS/IEEE Conference and Exhibition*. Bd. 4. IEEE, 2001, S. 2115–2123.
- [Min02] J. Minkoff. *Signal Processing Fundamentals and Applications for Communications and Sensing Systems (Artech House Signal Processing Library)*. Artech House, 2002.
- [Mol07] A. Moll. »Radarinterferometrische Untersuchungen mit ERS-1/2 auf der Antarktischen Halbinsel«. Dissertation. Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, 2007.
- [Mon08] I. H. B. Monaco. *IHO Standards For Hydrographic Surveys, Special Publication No. 44, 5th Edition*. Techn. Ber. International Hydrographic Organization, 2008.
- [Mon07] M. Montemerlo und S. Thrun. *FastSLAM: A Scalable Method for the Simultaneous Localization and Mapping Problem in Robotics*. Hrsg. von B. Siciliano, O. Khatib und F. Groen. (Springer Tracts in Advanced Robotics). Secaucus, NJ, USA: Springer-Verlag New York, Inc., 2007.
- [Moo02] K. Moore und J. Jaffe. »Time-evolution of high-resolution topographic measurements of the sea floor using a 3-D laser line scan mapping system«. In: *Oceanic Engineering, IEEE Journal of* 27.3 (Juli 2002), S. 525–545.
- [Mor85] H. Moravec und A. Elfes. »High resolution maps from wide angle sonar«. In: *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Bd. 2. März 1985, S. 116–121.

- [Mos09] M. Moser. »Bathymetric Uncertainty Model For The L-3 Klein 5410 Sidescan Sonar«. Masterarbeit. University of New Hampshire, 2009.
- [Mul00] P. J. Mulhearn, D. Science, T. O. (Australia), Aeronautical und M. R. L. (Australia). *Modelling acoustic backscatter from near-normal incidence echosounders : sensitivity analysis of the Jackson Model*. English. DSTO Aeronautical und Electronics Research Laboratory Melbourne, 2000, 36 p.
- [Mül04] G. Müller und M. Möser, (Hrsg.). *Taschenbuch der Technischen Akustik*. Springer Science + Business Media, 2004.
- [Mun09] W. Munk, P. Worcester und C. Wunsch. *Ocean acoustic tomography*. Cambridge University Press, 2009.
- [Mur12] K. P. Murphy. *Machine Learning: A Probabilistic Perspective*. 2nd ISBN 9780262018029. The MIT Press, 2012.
- [Nay91] S. K. Nayar, K. Ikeuchi und T. Kanade. »Surface reflection: physical and geometrical perspectives«. In: *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence* 13.7 (1991), S. 611–634.
- [Neg10a] S. Negahdaripour. »A new method for calibration of an opti-acoustic stereo imaging system«. In: *Proc. OCEANS 2010*. 2010, S. 1–7.
- [Neg07a] S. Negahdaripour. »Epipolar Geometry of Opti-Acoustic Stereo Imaging«. In: *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* 29.10 (Okt. 2007), S. 1776–1788.
- [Neg10b] S. Negahdaripour. »On 3-D reconstruction from stereo FS sonar imaging«. In: *Proc. OCEANS 2010*. 2010, S. 1–6.
- [Neg05] S. Negahdaripour, P. Firoozfam und P. Sabzmeydani. »On processing and registration of forward-scan acoustic video imagery«. In: *Proc. 2nd Canadian Conf. Computer and Robot Vision*. 2005, S. 452–459.
- [Neg07b] S. Negahdaripour, H. Pirsiavash und H. Sekkati. »Integration of Motion Cues in Optical and Sonar Videos for 3-D Positioning«. In: *Computer Vision and Pattern Recognition, 2007. CVPR '07. IEEE Conference on*. Juni 2007, S. 1–8.
- [Neg13] S. Negahdaripour. »On 3-D Motion Estimation From Feature Tracks in 2-D FS Sonar Video«. In: *IEEE Trans. Robot.* 29.4 (Aug. 2013), S. 1016–1030.
- [Nei01] J. Neira und J. Tardos. »Data association in stochastic mapping using the joint compatibility test«. In: *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 17.6 (2001), S. 890–897.

- [Neu25] F. Neumann. »NEUMANN, Die Entstehung des Echolots und sein Erfinder.« In: *Polytechnisches Journal* 340 (1925). Hrsg. von J. G. Dingler, S. 44–45.
- [Nij14] M. Nijhof, A. Espana und K. Williams. »Improved modeling accuracy of the elastic object response by inclusion of higher order scattering«. In: *Proceedings 2nd International Conference and Exhibition on Underwater Acoustics, UA2014, Rhodes, Greece*, Juni 2014, S. 473–479.
- [Ozo15] P. Ozog, G. Troni, M. Kaess, R. Eustice und M. Johnson-Roberson. »Building 3D Mosaics from an Autonomous Underwater Vehicle and 2D Imaging Sonar«. In: *IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation, ICRA*. To appear. Seattle, WA, Mai 2015.
- [Pad14] J. Padiál, S. Dektor und S. Rock. »Correlation of imaging sonar acoustic shadows and bathymetry for ROV terrain-relative localization«. In: *Proc. OCEANS 2014 - TAIPEI*. 2014, S. 1–10.
- [Pad13] J. Padiál, S. G. Dektor und S. M. Rock. »Correlation of Sidescan Sonar Acoustic Shadows and Bathymetry for Terrain-Relative Navigation«. In: *Unmanned Untethered Submersible Technology 2013*. Portsmouth, NH, Sep. 2013.
- [Pai13] Y. Pailhas, C. Capus, K. Brown und Y. Petillot. »Design of artificial landmarks for underwater simultaneous localisation and mapping«. In: *Radar, Sonar Navigation, IET* 7.1 (Jan. 2013), S. 10–18.
- [Pai10a] Y. Pailhas, C. Capus, K. Brown und P. Moore. »Analysis and classification of broadband echoes using bio-inspired dolphin pulses«. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 127.6 (2010), S. 3809–3820.
- [Pai14a] Y. Pailhas, C. Capus, K. Brown und N. Valeyrie. »Identifying content of low profile target in cluttered environment using the BioSonar«. In: *Proceedings of the 2nd Underwater Acoustics Conference (UAC) 2014, Rhodes*. 2014.
- [Pai14b] Y. Pailhas und Y. Petillot. »Synthetic aperture imaging and autofocus with coherent MIMO sonar systems«. In: *Proceedings of the synthetic aperture sonar & synthetic aperture radar conference 2014*. 2014.
- [Pai10b] Y. Pailhas, Y. Petillot und C. Capus. »High-resolution Sonars: What Resolution Do We Need for Target Recognition?«. In: *EURASIP J. Adv. Signal Process* 2010 (Feb. 2010), 42:1–42:13.
- [Pai09] Y. Pailhas, Y. Petillot, C. Capus und K. Brown. »Real-time sidescan simulator and applications«. In: *OCEANS 2009*. Mai 2009, S. 1–6.

- [Pau14] L. Paull, S. Saeedi, M. Seto und H. Li. »AUV Navigation and Localization: A Review«. In: *Oceanic Engineering, IEEE Journal of* 39.1 (Jan. 2014), S. 131–149.
- [Pen90] A. P. Pentland. »Linear shape from shading«. In: *International Journal of Computer Vision* 4.2 (1990), S. 153–162.
- [Pet12] S. Petersen. *Massivsulfide – Rohstoffe aus der Tiefsee*. Techn. Ber. GEOMAR, 2012.
- [Pet02] Y. Petillot, S. Reed und J. Bell. »Real time AUV pipeline detection and tracking using side scan sonar and multi-beam echo-sounder«. In: *OCEANS '02 MTS/IEEE*. Bd. 1. 2002, S. 217–222.
- [Pet14] Y. Petillot. *Lecture: Towards Robust ATR in Sonar Imagery*. Techn. Ber. University Defence Research Collaboration in Signal Processing, Heriot Watt University Edinburgh, 2014.
- [Pin07] P. Pinies und J. Tardos. »Scalable SLAM building conditionally independent local maps«. In: *Intelligent Robots and Systems, 2007. IROS 2007. IEEE/RSJ International Conference on*. 2007, S. 3466–3471.
- [Pop04] L. Poppe, V. Paskevich, S. Williams, M. Hastings, J. Kelley, D. Belknap, L. Ward, D. FitzGerald und P. Larsen. *Surficial Sediment Data from the Gulf of Maine, Georges Bank, and Vicinity: A GIS Compilation*. Techn. Ber. Woods Hole, MA: Woods Hole Field Center, U.S. Geological Survey, Coastal und Marine Geology Program., Dez. 2004.
- [Rab75] L. R. Rabiner und B. Gold. *Theory and Application of Digital Signal Processing*. Prentice Hall, 1975.
- [Rao93] N. Rao und M. Abury. »Evaluation of a pulse coding technique for speckle reduction and structure characterization«. In: *Proceedings of the IEEE ultrasonics symposium*. Chester F. Carlson Center for Imaging Science (COS). 1993.
- [Rao95] P. Rao, M. Vidyadhar, T. Rao und L. Venkataratnam. »An adaptive filter for speckle suppression in synthetic aperture radar images«. In: *International Journal of Remote Sensing* 16.5 (1995), S. 877–889.
- [Ree04] S. Reed, Y. Petillot und J. M. Bell. »Automated approach to classification of mine-like objects in sidescan sonar using highlight and shadow information«. In: *IEE Proceedings – Radar, Sonar and Navigation* 151.1 (Feb. 2004), S. 48–56.
- [Ree03] S. Reed, Y. Petillot und J. M. Bell. »An automatic approach to the detection and extraction of mine features in sidescan sonar«. In: *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 28.1 (Jan. 2003), S. 90–105.

- [Ree05] S. Reed, I. T. Ruiz, C. Capus und Y. Petillot. »The automatic fusion of classified sidescan sonar mosaics using CML-RTS and Markov random fields«. In: *Proc. Oceans 2005 - Europe*. Bd. 2. Juni 2005, S. 883–888.
- [Ree06] S. Reed, I. T. Ruiz, C. Capus und Y. Petillot. »The fusion of large scale classified side-scan sonar image mosaics«. In: *IEEE Transactions on Image Processing* 15.7 (Juli 2006), S. 2049–2060.
- [Rib08] D. Ribas, P. Ridao, J. D. Tardós und J. Neira. »Underwater SLAM for Structured Environments Using an Imaging Sonar«. Dissertation. Departament of Computer Engineering, Universitat de Girona, Mai 2008.
- [Ric05] M. Richards. *Fundamentals of Radar Signal Processing*. Hrsg. von M. Richards. McGraw-Hill, 2005.
- [Ric10] M. A. Richards, J. Scheer und W. A. Holm. *Principles of modern radar: basic principles*. SciTech Pub., 2010.
- [Rie03] A. Rieder. *Keine Probleme mit Inversen Problemen: Eine Einführung in ihre stabile Lösung*. Vieweg+Teubner Verlag, 2003.
- [Rio05] J. Riordan, E. Omerdic und D. Toal. »Implementation and application of a real-time sidescan sonar simulator«. In: *Oceans 2005 - Europe*. Bd. 2. Juni 2005, 981–986 Vol. 2.
- [Rom05] C. Roman und H. Singh. »Improved vehicle based multibeam bathymetry using sub-maps and SLAM«. In: *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems (IROS 2005)*. 2005, S. 3662–3669.
- [Ros15] D. Rose, W. Jans, J. Lowag und J. Wunderlich. »Acoustic Detection of Buried Objects - Tests And Results using a Parametric Sub-Bottom Profiler«. In: *Proceedings of the 3rd Underwater Acoustics Conference and Exhibition 2015, Crete*. 2015.
- [Ros14] T. Rossing, (Hrsg.). *Springer Handbook of Acoustics*. Springer Science + Business Media, LLC, 2014.
- [Ruf04] A. Ruffa. »High efficiency parametric sonar«. US6704247 B1. US Patent 6,704,247. März 2004.
- [Rui03] I. T. Ruiz, S. Reed, Y. Petillot, J. M. Bell und D. M. Lane. »Concurrent Mapping & Localisation using Side-Scan Sonar for Autonomous Navigation«. In: *Proceedings of the International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology (UUST)*. New Hampshire, USA, Aug. 2003.

- [Rui04] I. Ruiz, S. Raucourt, Y. Petillot und D. Lane. »Concurrent Mapping and Localization Using Sidescan Sonar«. In: *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 29.2 (Apr. 2004), S. 442–456.
- [Run07] A. Runnalls. »Kullback-Leibler Approach to Gaussian Mixture Reduction«. In: *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on* 43.3 (Juli 2007), S. 989–999.
- [Say13] M. Sayuri, K. Kageyoshi, K. Shirai, T. Tsuchiya und E. Nobuyuki. »Development of a Four-Dimensional Underwater Acoustic Imaging System«. In: *Proceedings of the 1st Underwater Acoustics Conference and Exhibition (UACE) 2013, Corfu*. 2013.
- [Say15] M. Sayuri, K. Kageyoshi, T. Tsuchiya, E. Nobuyuki und S. Tomoo. »Study On Underwater Acoustic Video Camera For ROV Work«. In: *Proceedings of the 3rd Underwater Acoustics Conference and Exhibition (UACE) 2015, Crete*. 2015.
- [Sch95] R. Schaback. »Creating Surfaces from Scattered Data Using Radial Basis Functions«. In: *Mathematical Methods in Computer Aided Geometric Design III*. Hrsg. von M. Dæhlen, T. Lyche und L. Schumaker. Vanderbilt Univ. Press, 1995, S. 477–496.
- [Set13] M. L. Seto, (Hrsg.). *Marine Robot Autonomy*. Springer Science + Business Media, 2013.
- [She07] C. Sherman und J. Butler. *Transducers and arrays for underwater sound*. Springer, 2007.
- [Sho98] P. Shoning, A. Sarkady und C. Wooten. »Use of pseudo-random codes in pulse compression«. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 103.5 (1998), S. 2944–2944.
- [Sim06] J. Simmonds und D. MacLennan. *Fisheries Acoustics: Theory and Practice (Fish and Aquatic Resources)*. Wiley-Blackwell, 2006.
- [Ske97] E. Skelton und J. James. *Theoretical Acoustics of Underwater Structures*. Imperial College Press, 1997.
- [Ski04] J. Skilling. »Programming the Hilbert curve«. In: *Bayesian Inference and Maximum Entropy Methods in Science and Engineering*. Hrsg. von G. Erickson und Y. Zhai. Bd. 707. American Institute of Physics Conference Series. Apr. 2004, S. 381–387.
- [Ste14] T. Stephan und J. Beyerer. »Computergraphical Model for Underwater Image Simulation and Restoration«. In: *Computer Vision for Analysis of Underwater Imagery (CVAUI), 2014 ICPR Workshop on*. Aug. 2014, S. 73–79.

- [Ste01] S. Stergiopoulos, G. Carter, S. Mehta, B. McTaggart und G. E. et al. *Advanced Signal Processing Handbook*. Hrsg. von S. Stergiopoulos. CRC Press LLC, Boca Raton, 2001.
- [Sum07] J. Summers, R. Soukup und R. Gragg. »Mathematical Modeling and Computer-Aided Manufacturing of Rough Surfaces for Experimental Study of Seafloor Scattering«. In: *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 32.4 (2007), S. 897–914.
- [Tar02] J. Tardós, J. Neira, P. Newman und J. Leonard. »Robust Mapping and Localization in Indoor Environments Using Sonar Data«. In: *I. J. Robotic Res.* 21.4 (2002), S. 311–330.
- [Ten03] I. Tena Ruiz, Y. Petillot und D. Lane. »Improved AUV navigation using side-scan sonar«. In: *OCEANS 2003. Proceedings*. Bd. 3. 2003, S. 1261–1268.
- [Thr05] S. Thrun, W. Burgard und D. Fox. *Probabilistic Robotics*. Hrsg. von . 6. p. (2005. MIT Press, 2005.
- [Thy15] K. Thygesen und E. Baker. *The Shelf Programme: A decade of successfully helping to secure the sovereign maritime rights of developing Coastal States*. Techn. Ber. GRID-Arendal, 2015.
- [Tit04] D. H. Titterton und J. L. Weston. *Strapdown Inertial Navigation Technology*. 2nd Edition. The Institution of Electrical Engineers, The American Institute of Aeronautics und Astronautics, 2004.
- [Tol66] I. Tolstoy und C. Clay. *Ocean Acoustics: Theory and Experiment in Underwater Sound*. McGraw-Hill advanced physics monographs series. McGraw-Hill, 1966.
- [Too89] J. Toomay. *Radar principles for the non-specialist*. 1989.
- [Tra10] U. D. O. Transportation. *Pipeline Safety: Updating Facility Response Plans in Light of the Deepwater Horizon Oil Spill*. Pipeline und Hazardous Materials Safety Administration (PHMSA), 2010.
- [Tre10] B. E. Treeby und B. T. Cox. »k-Wave: MATLAB toolbox for the simulation and reconstruction of photoacoustic wave fields«. In: *J. Biomed. Opt.* 15.2 (2010), S. 021314.
- [Tre12] B. E. Treeby, J. Jaros, A. P. Rendell und B. T. Cox. »Modeling nonlinear ultrasound propagation in heterogeneous media with power law absorption using a k-space pseudospectral method«. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 131.6 (2012), S. 4324.

- [Urb02] H. G. Urban. *Handbuch der Wasserschalltechnik*. Eigenverl. STN Atlas Elektronik GmbH, 2002.
- [Uri83] R. Urick. *Principles Of Underwater Sound*. 3rd. McGraw-Hill Ryerson, Limited, 1983.
- [Van14] M. VanMiddlesworth. »Toward Autonomous Underwater Mapping in Partially Structured 3D Environments«. Masterarbeit. Massachusetts Institute of Technology, 2014.
- [Van15] M. VanMiddlesworth, M. Kaess, F. Hover und J. Leonard. »Mapping 3D Underwater Environments with Smoothed Submaps«. In: *Field and Service Robotics, Springer Tracts in Advanced Robotics*. Brisbane, Australia, Dez. 2015, S. 17–30.
- [Vic98] K. Vickery. »Acoustic positioning systems. New concepts-the future«. In: *Autonomous Underwater Vehicles, 1998. AUV'98. Proceedings Of The 1998 Workshop on*. Aug. 1998, S. 103–110.
- [Vor99] A. G. Voronovich. *Wave Scattering from Rough Surfaces*. Hrsg. von L. Brekhovskikh, L. Felsen und H. Haus. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1999.
- [Wai02] A. D. Waite. *Sonar for Practising Engineers*. 3rd. John Wiley & Sons Ltd, 2002.
- [Wal08] M. Walter, F. Hover und J. Leonard. »SLAM for ship hull inspection using exactly sparse extended information filters«. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE. 2008, S. 1463–1470.
- [Wen07] J. Wendel. *Integrierte Navigationssysteme: Sensordatenfusion, GPS und Inertiale Navigation*. Oldenbourg, 2007.
- [Wer10] M. Werner. *Nachrichtentechnik*. Springer Science + Business Media, 2010.
- [Wes06] B. Wessel. »Automatische Extraktion von Straßen aus SAR-Bilddaten«. Dissertation. Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Technische Universität München, 2006.
- [Wil05] P. Wille. *Sound images of the ocean: in research and monitoring*. Bd. 1. Springer Science + Business Media, 2005.
- [Wil13] D. P. Williams und E. Fakiris. »A new environmentally adaptive classification algorithm for underwater mines in SAS imagery«. In: *Proceedings of the 1st International Conference on Underwater Acoustics (UAC), Corfu, Greece*. 2013.

- [Wil11] D. Williams und J. Groen. »A fast physics-based, environmentally adaptive underwater object detection algorithm«. In: *Proc. IEEE - Spain OCEANS*. 2011, S. 1–7.
- [Wil01] S. Williams, G. Dissanayake und H. Durrant-Whyte. »Towards terrain-aided navigation for underwater robotics«. In: *Advanced Robotics* 15.5 (2001), S. 533–549.
- [Zan13] S. Zandara, P. Ridao, D. Ribas, A. Mallios und A. Palomer. »Probabilistic surface matching for bathymetry based SLAM«. In: *Robotics and Automation (ICRA), 2013 IEEE International Conference on*. 2013, S. 40–45.
- [Zer09] B. Zerr, J. Fawcett und D. Hopkin. »Adaptive algorithm for sea mine classification«. In: *Proceedings of the 3rd Underwater Acoustics Measurements: Technology & Results UAM 2009 conference (UAM2009)*. 2009.
- [Zer96] B. Zerr und B. Stage. »Three-Dimensional Reconstruction of Underwater Objects from a Sequence of Sonar Images«. In: III (1996), S. 927–930.
- [Zha08] G. Zhang. »Smoothing splines using compactly supported, positive definite, radial basis functions«. In: *Computational Statistics* (2008). 10.1007/s00180-011-0277-x, S. 1–12.

Eigene Veröffentlichungen

- [Woo10a] P. Woock. »Deep Sea Navigation using SLAM«. In: *Proceedings of the 2009 Joint Workshop of Fraunhofer IOSB and Institute for Anthropomatics, Vision and Fusion Laboratory 4* (2010). Hrsg. von J. Beyerer und M. Huber.
- [Woo10b] P. Woock und C. Frey. »Deep-Sea AUV Navigation Using Side-scan Sonar Images and SLAM«. In: *Proceedings of the IEEE Oceans Conference 2010*. Mai 2010.
- [Woo11a] P. Woock. »Deep-sea seafloor shape reconstruction from side-scan sonar data for AUV navigation«. In: *OCEANS, 2011 IEEE - Spain*. Juni 2011, S. 1–7.
- [Woo11b] P. Woock. »Side-Scan Sonar Based SLAM for the Deep Sea«. In: *Proceedings of the 2010 Joint Workshop of Fraunhofer IOSB and Institute for Anthropomatics, Vision and Fusion Laboratory*. Karlsruher Schriften zur Anthropomatik 7 (2011). Hrsg. von J. Beyerer und M. Huber.
- [Woo12a] P. Woock. »Navigation using 3D features from side-scan sonar data for a deep-sea AUV«. In: *Proceedings of the 2011 Joint Workshop of Fraunhofer IOSB and Institute for Anthropomatics, Vision and Fusion Laboratory*. Karlsruher Schriften zur Anthropomatik (2012). Hrsg. von J. Beyerer und A. Pak.
- [Woo12b] P. Woock. »On SLAM-based vehicle navigation with side-scan sonar data for an AUV«. In: *Proceedings of the Waterside Security Conference 2012, Singapore*. 2012.
- [Woo12c] P. Woock. »Survey on suitable 3D features for sonar-based underwater navigation«. In: *Proceedings of IEEE/MTS Oceans 2012, Yeosu, KOREA*. 21-24 May. Mai 2012.
- [Woo13a] P. Woock. »Kernel based surface reconstruction in a side-scan sonar simulation framework«. In: *Proceedings of the 1st Underwater Acoustics Conference 2013, Corfu*. 2013.
- [Woo13b] P. Woock. »Side-scan sonar simulation for a kernelized seafloor shape reconstruction approach«. In: *Proceedings of the IEEE/MTS Oceans 2013 (Bergen, Norway)*. ISBN: 978-1-4799-0000-8. 2013.

- [Woo14a] P. Woock und J. Beyerer. »Seafloor shape estimation by raytraced kernels«. In: *Proceedings of IEEE/MTS Oceans 2014, Taipei, Taiwan*. ISBN: 978-1-4799-3645-8. 2014.
- [Woo14b] P. Woock und A. Pak. »Bayesian Reconstruction of Seafloor Shape from Side-Scan Sonar Measurements using a Markov Random Field«. In: *Proceedings of the 2nd Underwater Acoustics Conference (UAC) 2014, Rhodes*. 2014.
- [Woo15a] P. Woock und J. Beyerer. »Seafloor heightmap generation using 1D Kernel Reconstructions«. In: *Proceedings of the 3rd Underwater Acoustics Conference and Exhibition (UACE) 2015, Crete*, ★ UACE Young Scientist Award. ISSN: 2408-0195. 2015.
- [Woo15b] P. Woock, T. Stephan und J. Beyerer. »Approaches to Acoustic and Visual Underwater Sensing«. In: *at - Automatisierungstechnik* 63.5 (Apr. 2015), S. 334–343.

Absorption in Seewasser

Die Formel von François und Garrison (z.B. in [Kra13]) ist für den Frequenzbereich 100Hz bis 1 MHz gültig und beschreibt die Absorption in Meerwasser mit den absorbierenden Hauptkomponenten Borsäure (H_3BO_3) und Magnesiumsulfat (MgSO_4).

$$\alpha_w = \underbrace{\frac{A_1 P_1 f_1 f^2}{f_1^2 + f^2}}_{\text{Borsäure } \text{H}_3\text{BO}_3} + \underbrace{\frac{A_2 P_2 f_2 f^2}{f_2^2 + f^2}}_{\text{Magnesiumsulfat } \text{MgSO}_4} + \underbrace{A_3 P_3 f^2}_{\text{Viskosität reinen Wassers}} \quad (\text{A.1})$$

$$A_1 = \frac{8,686}{c} \cdot 10^{0,78\text{pH}-5}$$

$$f_1 = 2,8 \sqrt{\frac{S}{35}} \cdot 10^{4 - \frac{1245}{T+273}}$$

$$P_1 = 1$$

$$c = 1412 + 3,21T + 1,19S + 0,0167z_{\text{max}}$$

$$A_2 = 21,44 \frac{S}{c} (1 + 0,025T)$$

$$f_2 = \frac{8,17 \cdot 10^8 - 1990/(T+273)}{1 + 0,0018(S - 35)}$$

$$P_2 = 1 - 1,37 \cdot 10^{-4} z_{\text{max}} + 6,2 \cdot 10^{-9} z_{\text{max}}^2$$

$$A_3 = \begin{cases} 4,937 \cdot 10^{-4} - 2,59 \cdot 10^{-5} T + 9,11 \cdot 10^{-7} T^2 - ,5 \cdot 10^{-8} T^3 & \text{für } T \leq 20^\circ\text{C} \\ 3,964 \cdot 10^{-4} - 1,146 \cdot 10^{-5} T + 1,45 \cdot 10^{-7} T^2 - 6,5 \cdot 10^{-10} T^3 & \text{für } T \geq 20^\circ\text{C} \end{cases}$$

$$P_3 = 1 - 3,83 \cdot 10^{-5} z_{\text{max}} + 4,9 \cdot 10^{-10} z_{\text{max}}^2$$

wobei f in kHz, T in $^\circ\text{C}$, S in ppt angegeben werden. Weiter sind z_{max} die Wassertiefe in Metern, pH der pH-Wert des Wassers und c die Schallgeschwindigkeit in m/s.

Noch detailliertere Modelle wie das von Mellen [Mel87] berücksichtigen zusätzlich noch den Einfluss von Magnesiumcarbonat (MgCO_3).

Genauigkeitsanforderungen

Eine Untersuchung der Unsicherheiten bei der Aufnahme mit einem interferometrischen (also profilbildenden) Sidescan-Sonar ist in [Mos09] gegeben.

B.1 Welche Auflösung ist nötig für Target-Erkennung?

In [Pai10b] gehen Pailhas et al. der Frage nach, welche Auflösung zur Erkennung von Zielen überhaupt notwendig ist. Mit Zielen sind hier allerdings MLOs (engl. *mine-like objects*) gemeint, so dass sich die Erkenntnisse nicht ohne Weiteres auf sämtliche Fragestellungen der Kartierung erweitern lassen.

B.2 Kommerzielle Kartierung

Kommerzielle Anbieter für Auftragskartierungen bekommen von den Auftraggebern üblicherweise mitgeteilt, in welcher Genauigkeit eine Kartierung zu erfolgen hat. Dies erfolgt meist in den durch die International Hydrographic Organization (IHO) festgelegten Qualitätsstufen.

B.2.1 Total Propagated Uncertainty (TPU)

Die Total Propagated Uncertainty (TPU) bzw. Total Propagated Error (TPE) ist eine Angabe, die die gesamte Messkette der Datenaufnahme beschreibt und die gemessenen Daten mit Unsicherheitswerten versieht.

Allerdings ist der Sonarsensor nicht die einzige Unsicherheitsquelle, durch ungenaue Montage und Gezeiteneffekte kommen weitere Unsicherheiten dazu. Über den zeitlichen Verlauf einer Messmission akkumulieren zudem noch die Fehler der Eigenbewegungsschätzung. Beispielsweise berücksichtigt der CUBE-Algorithmus die TPU bei der Schätzung einer Oberfläche (Siehe auch Abschnitt 7.8.3).

Da viele Hersteller ihren Geräten allerdings keine Unsicherheitsbeschreibungen beilegen, müssen die Unsicherheitswerte für Teilkomponenten aus der Erfahrung des Operators geschätzt werden.

B.2.2 S44-IHO Datenqualität

Die IHO hat folgende Genauigkeiten für hydrographische Missionen in dem Dokument S-44 [Mon08] festgelegt. Die größte Genauigkeit wird in der Stufe »Special Order« erreicht, die Stufe Order 1 ist weniger genau und Stufe Order 2 noch ungenauer. Die zulässigen Unsicherheiten wachsen mit der Wassertiefe d_w . Die 95%igem Konfidenz-Fehlergrenzen sind durch eine Vorschrift der Form $\pm\sqrt{a^2 + (bd_w)^2}$ gegeben. Für jede Stufe sind die Parameter a und b vorgegeben, wobei a die Summe aller konstanten Fehler und b die Summe aller tiefenabhängigen Fehler darstellt.

Bereits vor einer Messkampagne werden die verwendeten Geräte anhand ihrer Messunsicherheit für die notwendige IHO-Order ausgesucht und die Unsicherheitswerte der Messgeräte zu einer Gesamtunsicherheit (engl. *total propagated uncertainty, TPU*) verrechnet. Durch manuelle Nachbearbeitung werden die Daten bei der Prozessierung bereinigt und auf Fehler untersucht. Die zulässigen Unsicherheiten für Aufnahmen in der Tiefsee stellen für moderne Sonargeräte selbst bei IHO Special Order keine Herausforderung dar, problematischer ist eher die globale Referenzierung der Daten. Wie schwach die Anforderungen letztlich sind, sieht man daran, dass durch die manuelle Nachbearbeitung der Daten die Fehlergrenzen gut eingehalten werden können, da eine Ausreißerbehandlung die Standardabweichung der Daten beliebig reduzieren kann. Solch eine Filterung könnte sogar herstellerseitig im Sonargerät passieren.

B.2.2.1 IHO Special Order

Die Special Order Anforderung findet meist nur bis Tiefen von 20–40 Metern Anwendung wo Freigängigkeit unter dem Kiel kritisch ist. Sie wird i.A. für Häfen, Ankerplätze und evtl. kritische Zugangswege zu diesen gefordert. Daher ist eine systematische Kartierung der Meeresbodenoberfläche erforderlich. Für IHO Special Order werden folgende Unsicherheitsparameter vorausgesetzt: $a = 0,25$ und $b = 0,0075$. Zudem müssen würfelförmige Objekte mit Kantenlänge 1 Meter und größer erkannt werden. Als horizontale Unsi-

cherheit sind 2 Meter vorgeschrieben. Laut Datenblatt erreichen moderne Multibeam-Sonare sogar noch deutlich niedrigere Unsicherheiten. Diese sind allerdings für den Optimalfall angegeben. Besonders große Schwadbreiten führen zu einem sehr flachen Auftreffwinkel des Schalls und zu deutlich größerer Unsicherheit.

B.2.2.2 Order 1

Order 1 Anforderungen gelten für Häfen und Hafenzugangswege und in manchen Küstengegenden bis 100m Wassertiefe.

Order 1a

Bei Order 1a ist wie bei Special Order eine systematische Kartierung der Meeresbodenoberfläche erforderlich. Es gelten $a = 0,5$ und $b = 0,013$. Es müssen würfelförmige Objekte mit Kantenlänge 2 Meter und größer erkannt werden. Als horizontale Unsicherheit sind $5\text{ m} + 5\%$ der Tiefe vorgeschrieben.

Order 1b

Bei Anwendungen nach Order 1b reicht eine allgemeine Vorstellung der Meeresbodenform. Order 1b hat die gleichen Anforderungen an die Unsicherheit wie Order 1a, jedoch ist keine systematische Kartierung des Meeresbodens notwendig. D.h. die Datendichte darf niedriger sein und die minimal geforderte Datendichte limitiert automatisch die Größe von potentiell undetektierten Objekten.

B.2.2.3 Order 2

Für größere Tiefen als 100 Meter wird nur Order 2 gemacht, weil es hier als unwahrscheinlich gesehen wird, dass menschliche oder natürliche Objekte existieren, die groß genug sind, um auf Schifffahrtswege Einfluss zu nehmen und trotzdem bei Order 2 unentdeckt zu bleiben. Es gelten $a = 0,5$ und $b = 0,023$. Als horizontale Unsicherheit sind $20\text{ m} + 10\%$ der Tiefe vorgeschrieben.

B.2.2.4 Kritik

Clarke [Cla97] beschreibt die Problematik des von der International Hydrographic Organization (IHO) ungenau definierten Begriffs der sog. *full bottom coverage* und erläutert die Einflüsse bezüglich der Abdeckung für unterschiedliche Eigenbewegungen und Strahlformen. Er zeigt auch exemplarisch für

verschiedene Sonartypen deren Bodenabdeckung. Aufgrund solcher berechtigten Kritik hat die IHO in der aktuellen Auflage der Richtlinien [Mon08] den Begriff der *full bottom coverage* gestrichen und durch die Anforderung einer systematischen Kartierung ersetzt.

Rayleigh-Statistik für schmalbandiges Rauschen

Diese Herleitung orientiert sich an [Lur10]: Bei einer Mischung von N Schmalbandsignalen mit gleichverteilter Phase kann das Summensignal folgendermaßen geschrieben werden:

$$x = \sum_{n=1}^N a_n \exp(i(\omega t + \varphi_n)) = a \exp(i(\omega t + \psi)) = e^{i\omega t} \sum_{n=1}^N a_n e^{i\varphi_n t}. \quad (\text{C.1})$$

Nach Ausklammern des gemeinsamen Terms $\exp(i\omega t)$ kann man Real- und Imaginärteil trennen:

$$x = x_1 + ix_2 \quad (\text{C.2})$$

$$\text{mit } x_1 = \sum_{n=1}^N a_n \cos \varphi_n \quad \text{und} \quad x_2 = \sum_{n=1}^N a_n \sin \varphi_n. \quad (\text{C.3})$$

Geht N gegen unendlich gehen x_1 und x_2 aufgrund des zentralen Grenzwertsatzes in gaußsche Variablen mit der gleichen Varianz

$$\sigma^2 = \sum_{n=1}^N a_n^2 \quad (\text{C.4})$$

über und eine Gaußverteilung beschreibt den Momentanwert des Schmalbandsignals gut. Die Variable $X = x_1^2 + x_2^2$ folgt dann einer Chi-Quadrat-Verteilung χ^2 mit zwei Freiheitsgraden:

$$f(X) = \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{X}{2\sigma^2}\right) \quad \text{für } X \geq 0. \quad (\text{C.5})$$

Dies entspricht einer Exponentialverteilung und beschreibt die Wahrscheinlichkeitsdichte der Energie des Signals. Die Wahrscheinlichkeitsdichte der Amplitude $a = \sqrt{X}$ ist demnach:

$$f(a) = \frac{a}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{a^2}{2\sigma^2}\right). \quad (\text{C.6})$$

Diese Verteilung ist als Rayleighverteilung bekannt. Die Rayleighverteilung wird in der Unterwasserakustik oft verwendet, weil sie die Amplitudenfluktuationen einer additiven Überlagerung einer großen Menge an gleichartigen Streuzentren beschreibt. Das kann durch Mehrwegeausbreitung, Volumestreueung oder durch die Oberflächenbeschaffenheit der Fall sein, was häufig auftretenden Gegebenheiten entspricht.

Sind die Streuzentren in der Menge nicht gleichartig, weil etwa ein Streuzentrum dominant ist, kommen andere Verteilungen zum Einsatz, wie die Rice-Verteilung oder auch Weibull- und K -Verteilungen.

MRF-Energiedefinitionen nach Liu

Liu [Liu11] definiert die unitären und paarweisen Energien wie folgt:

$$\mathfrak{E}_u(o(t,d)) = w_u(1 - o(t,d))^2 \quad (\text{D.1})$$

Die Nachrichten lauten also folgendermaßen, wobei der Faktorbezeichner f hier den unitären Faktor bezeichnet:

$$M_{f \rightarrow id}(o(t,d) = 0) = w_u(1 - o(t,d))^2 = w_u \quad (\text{D.2})$$

$$M_{f \rightarrow id}(o(t,d) = 1) = w_u(1 - o(t,d))^2 = 0, \quad (\text{D.3})$$

Dabei ist aber nur der relative Unterschied von Bedeutung und die normalisierte Nachricht sieht daher folgendermaßen aus:

$$M_{f \rightarrow id}(o(t,d)) = M_{f \rightarrow id}(o(t,d) = 1) - M_{f \rightarrow id}(o(t,d) = 0) = -w_u \quad (\text{D.4})$$

Bei der paarweisen Energie gilt folgendes, wobei der Faktorbezeichner f hier den paarweisen Faktor bezeichnet.

$$\mathfrak{E}_p(o(t,d), o(t',d')) = \begin{cases} 0, & (o(t,d), o(t',d')) = (0,0) \\ w_p, & (o(t,d), o(t',d')) = (0,1) \\ w_p, & (o(t,d), o(t',d')) = (1,0) \\ 0, & (o(t,d), o(t',d')) = (1,1) \end{cases} \quad (\text{D.5})$$

$$\begin{aligned} M_{f \rightarrow id}(o(t,d) = 0) &= \min\left(\mathfrak{E}_p(0,1) + M_{id \rightarrow f}(o(t,d) = 1), \right. \\ &\quad \left. \mathfrak{E}_p(0,0) + M_{id \rightarrow f}(o(t,d) = 0)\right) \\ &= \min\left(w_p + M_{id \rightarrow f}(o(t,d) = 1), \right. \\ &\quad \left. 0 + M_{id \rightarrow f}(o(t,d) = 0)\right), \end{aligned} \quad (\text{D.6})$$

$$\begin{aligned}
 M_{f \rightarrow id}(o(t,d) = 1) &= \min\left(\mathfrak{E}_p(1,0) + M_{id \rightarrow f}(o(t,d) = 0), \right. \\
 &\quad \left. \mathfrak{E}_p(1,1) + M_{id \rightarrow f}(o(t,d) = 1)\right) \\
 &= \min\left(w_p + M_{id \rightarrow f}(o(t,d) = 0), \right. \\
 &\quad \left. 0 + M_{id \rightarrow f}(o(t,d) = 1)\right) \tag{D.7}
 \end{aligned}$$

Das bedeutet für die normalisierte Messung:

$$\begin{aligned}
 M_{f \rightarrow id}(o(t,d)) &= M_{f \rightarrow id}(o(t,d) = 1) - M_{f \rightarrow id}(o(t,d) = 0) \\
 &= \min\left(w_p + M_{id \rightarrow f}(o(t,d) = 0), 0 + M_{id \rightarrow f}(o(t,d) = 1)\right) \\
 &\quad - \min\left(w_p + M_{id \rightarrow f}(o(t,d) = 1), 0 + M_{id \rightarrow f}(o(t,d) = 0)\right) \\
 &= \min\left(w_p, M_{id \rightarrow f}(o(t,d) = 1) - M_{id \rightarrow f}(o(t,d) = 0)\right) \\
 &\quad - \min\left(w_p + M_{id \rightarrow f}(o(t,d) = 1) - M_{id \rightarrow f}(o(t,d) = 0), 0\right) \\
 &= \min\left(w_p, M_{id \rightarrow f}(o(t,d))\right) - \min\left(w_p + M_{id \rightarrow f}(o(t,d)), 0\right) \tag{D.8}
 \end{aligned}$$

Was man bei der Promotion *wirklich* lernt

»So eine Arbeit wird eigentlich nie fertig, man muss sie für fertig erklären, wenn man nach Zeit und Umständen das Möglichste getan hat.«

JOHANN WOLFGANG VON GOETHE
ÜBER DIE ARBEIT AN DER »IPHIGENIE« (AUF TAURIS), MÄRZ 1787



»PILED HIGHER AND DEEPER« BY JORGE CHAM

WWW.PHDCOMICS.COM

Stichwortverzeichnis

A

Absorption	30
Alphabet	225
ambient noise	57
ATR	15, 284
Automated Target Recognition	15, 284

B

Bandbreiten-Zeit-Produkt	166
beamforming	78
Benthos	20
Bergbau	9
broadside	66

C

Clutter	59
Continuous wave (CW)-Puls ..	165
CTD	23

D

Dezibel	28
diffuse Streuung	47
Dispersion	31
DVL	97, 110

E

ebene Welle	26
EKF	110
EM-Verfahren	207
endfire	66
Expectation-Maximization- Verfahren	207

F

Fächerecholot	89
Facettenmodell	50
Faktor	235, 237
Faktorgraph	234
FBR	59
FM-Puls	165

G

gap filling	79
-------------------	----

I

IHO	90, 319ff.
Impedanz	39
InSAS	88
Interferometrisches SAS	88
International Hydrographic Organization	319

J

Jackson-Modell 52

K

Kavitation 33
 Kernel 146, 154, 160
 Kontinentalschelf 17

L

LBL 98
 LBP 238
 Loopy Belief Propagation 238

M

Manganknollen 10
 Markov Random Field 235
 matched filter 114
 MBES 89
 Mechanically Scanning Imaging
 Sonar 81
 Minen 15
 MLO 319
 MRF 110, 235
 MSIS 81
 Multibeam-Sonar 89
 Munition 15

N

Nadirlücke 79, 154
 neritische Zone 20

Nordsuche 96

P

Pelagial 20
 Pipelines 14
 post-processing 101
 power law distribution 131

R

Rückstreugrad 46
 Rasenmähermuster 79
 Raytracing 27, 124, 225
 Reflexionskoeffizient 39
 Richtmaß 178

S

Salinität 22
 Salzgehalt 22
 SAS 83
 SBL 99
 Schallwandler 64
 Schleppfisch 69
 Seitensichtsonar 68
 Seltene Erden 10f.
 Sidescan-Sonar 68
 Signal-zu-Rausch-Verhältnis .. 167
 Signallaufzeit 182
 slant range 70
 SNR 167
 Sonar post-processing 101
 Sonaralphabet 225
 Sound Velocity Profile 163
 sound velocity profile 22
 Speckle 60, 164

SSS	68
Stop-and-hop	124
Streuungsfunktion	45
Streugrad	45
SVP	22, 163

T

TL	29
Tow fish	69
Transducer	64
Transmission loss	29
Transponder	98
two-way travel time	182

U

Umgebungsrauschen	57
UNCLOS	16
Unterseekabel	14
USBL	99

W

Wellenzahl	177
------------------	-----

X

XBT	23
-----------	----

Karlsruher Schriftenreihe zur Anthropomatik (ISSN 1863-6489)

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Beyerer

Die Bände sind unter www.ksp.kit.edu als PDF frei verfügbar
oder als Druckausgabe bestellbar.

- Band 1** Jürgen Geisler
Leistung des Menschen am Bildschirmarbeitsplatz. 2006
ISBN 3-86644-070-7

- Band 2** Elisabeth Peinsipp-Byma
**Leistungserhöhung durch Assistenz in interaktiven Systemen
zur Szenenanalyse.** 2007
ISBN 978-3-86644-149-1

- Band 3** Jürgen Geisler, Jürgen Beyerer (Hrsg.)
Mensch-Maschine-Systeme. 2010
ISBN 978-3-86644-457-7

- Band 4** Jürgen Beyerer, Marco Huber (Hrsg.)
**Proceedings of the 2009 Joint Workshop of Fraunhofer IOSB and
Institute for Anthropomatics, Vision and Fusion Laboratory.** 2010
ISBN 978-3-86644-469-0

- Band 5** Thomas Usländer
Service-oriented design of environmental information systems. 2010
ISBN 978-3-86644-499-7

- Band 6** Giulio Milighetti
**Multisensorielle diskret-kontinuierliche Überwachung und
Regelung humanoider Roboter.** 2010
ISBN 978-3-86644-568-0

- Band 7** Jürgen Beyerer, Marco Huber (Hrsg.)
**Proceedings of the 2010 Joint Workshop of Fraunhofer IOSB and
Institute for Anthropomatics, Vision and Fusion Laboratory.** 2011
ISBN 978-3-86644-609-0

- Band 8** Eduardo Monari
**Dynamische Sensorselektion zur auftragsorientierten
Objektverfolgung in Kameranetzwerken.** 2011
ISBN 978-3-86644-729-5

- Band 9** Thomas Bader
Multimodale Interaktion in Multi-Display-Umgebungen. 2011
ISBN 3-86644-760-8
- Band 10** Christian Frese
Planung kooperativer Fahrmanöver für kognitive Automobile. 2012
ISBN 978-3-86644-798-1
- Band 11** Jürgen Beyerer, Alexey Pak (Hrsg.)
Proceedings of the 2011 Joint Workshop of Fraunhofer IOSB and Institute for Anthropomatics, Vision and Fusion Laboratory. 2012
ISBN 978-3-86644-855-1
- Band 12** Miriam Schleipen
Adaptivität und Interoperabilität von Manufacturing Execution Systemen (MES). 2013
ISBN 978-3-86644-955-8
- Band 13** Jürgen Beyerer, Alexey Pak (Hrsg.)
Proceedings of the 2012 Joint Workshop of Fraunhofer IOSB and Institute for Anthropomatics, Vision and Fusion Laboratory. 2013
ISBN 978-3-86644-988-6
- Band 14** Hauke-Hendrik Vagts
Privatheit und Datenschutz in der intelligenten Überwachung: Ein datenschutzgewährendes System, entworfen nach dem „Privacy by Design“ Prinzip. 2013
ISBN 978-3-7315-0041-4
- Band 15** Christian Kühnert
Data-driven Methods for Fault Localization in Process Technology. 2013
ISBN 978-3-7315-0098-8
- Band 16** Alexander Bauer
Probabilistische Szenenmodelle für die Luftbildauswertung. 2014
ISBN 978-3-7315-0167-1
- Band 17** Jürgen Beyerer, Alexey Pak (Hrsg.)
Proceedings of the 2013 Joint Workshop of Fraunhofer IOSB and Institute for Anthropomatics, Vision and Fusion Laboratory. 2014
ISBN 978-3-7315-0212-8
- Band 18** Michael Teutsch
Moving Object Detection and Segmentation for Remote Aerial Video Surveillance. 2015
ISBN 978-3-7315-0320-0

- Band 19** Marco Huber
**Nonlinear Gaussian Filtering:
Theory, Algorithms, and Applications.** 2015
ISBN 978-3-7315-0338-5
- Band 20** Jürgen Beyerer, Alexey Pak (Hrsg.)
**Proceedings of the 2014 Joint Workshop of Fraunhofer IOSB and
Institute for Anthropomatics, Vision and Fusion Laboratory.** 2014
ISBN 978-3-7315-0401-6
- Band 21** Todor Dimitrov
**Permanente Optimierung dynamischer Probleme
der Fertigungssteuerung unter Einbeziehung von
Benutzerinteraktionen.** 2015
ISBN 978-3-7315-0426-9
- Band 22** Benjamin Kühn
Interessengetriebene audiovisuelle Szenenexploration. 2016
ISBN 978-3-7315-0457-3
- Band 23** Yvonne Fischer
**Wissensbasierte probabilistische Modellierung für die
Situationsanalyse am Beispiel der maritimen Überwachung.** 2016
ISBN 978-3-7315-0460-3
- Band 24** Jürgen Beyerer, Alexey Pak (Hrsg.)
**Proceedings of the 2015 Joint Workshop of Fraunhofer IOSB and
Institute for Anthropomatics, Vision and Fusion Laboratory.** 2016
ISBN 978-3-7315-0519-8
- Band 25** Pascal Birnstill
**Privacy-Respecting Smart Video Surveillance
Based on Usage Control Enforcement.** 2016
ISBN 978-3-7315-0538-9
- Band 26** Philipp Woock
**Umgebungskartenschätzung aus Sidescan-Sonardaten
für ein autonomes Unterwasserfahrzeug.** 2016
ISBN 978-3-7315-0541-9

Lehrstuhl für Interaktive Echtzeitsysteme
Karlsruher Institut für Technologie

Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und
Bildauswertung IOSB Karlsruhe

Die Arbeit beschäftigt sich mit der Erzeugung von Höhenkarten des Meeresbodens aus Sonardaten eines bildgebenden Sidescan-Sonars. Die Bathymetrie lässt sich aus diesen Daten nur indirekt gewinnen, da sie keine Abstands-, sondern nur Reflexionsinformationen enthalten. Zukünftig soll die Gestalt des Meeresbodens anhand solcher Sonardaten automatisiert erfasst werden, um mit den entstandenen Höhenkarten die Genauigkeit der Navigation eines autonomen Unterwasserfahrzeugs zu verbessern. Dazu wurde zunächst eine leistungsfähige Sidescan-Sonardaten-Simulationsumgebung geschaffen, die u.a. in der Lage ist, verschiedene Terraintypen zu modellieren, verschiedene Sonaraufnahmemodi zu berücksichtigen und beliebige dreidimensionale Szenen zu simulieren. Für die Schätzung der Höhenkarten aus Sidescan-Sonardaten liefert die Arbeit drei Beiträge, wobei den Hauptteil der Arbeit ein neues Schätzverfahren bildet, das Sonarmessungen aus vorberechneten Sonarantworten von Basiselementen, sog. Kernen, zusammensetzt. Durch die örtlichen Repräsentationen der Kernel wird für jede Messung ein Höhenprofil gewonnen. Diese kernelbasierten Höhenprofile werden in eine globale Karte eingetragen und mit anderen Schätzungen aus anderen Messungen über ein Distanzmaß zu einer Gesamtkarte fusioniert.

ISSN 1863-6489
ISBN 978-3-7315-0541-9

