

Kurzfassung

Diese Arbeit untersucht verschiedene, in der optischen Bildverarbeitung bereits etablierte Algorithmen zur Konvertierung von Bildern mit einer hohen Dynamik in Bilder mit einer niedrigen Dynamik. Als Dynamik wird hierbei die mögliche Anzahl an verschiedenen Farben, beziehungsweise Grautönen bezeichnet. Die Idee der Arbeit besteht darin, diese Verfahren erstmals auf Radardaten anzuwenden. Zunächst erfolgt eine Beschreibung der jeweiligen Techniken zur optischen und radartechnischen Bildaufnahme. Dabei wird auf physikalische und technische Grundprozesse, sowie die visuellen Unterschiede eingegangen. Daraufhin erfolgt eine Vorstellung verschiedener Methoden um Bilder mit hoher Dynamik zu komprimieren. Im Verlauf dieser wird die Implementation eines Maskenalgorithmus' in Python dargestellt. Abschließend werden für Radarbilder optimierte Parameter für jede Methode ermittelt und die Ergebnisse miteinander verglichen.

Abstract

This thesis investigates the effect of several algorithms for high dynamic to low dynamic range compression applied to SAR-images. In this case the dynamic range is the range of possible gray values or colors contained in an image. Therefore the first part will cover the current problem. Then techniques for both radar and optical image acquisition are explored. During this exploration technical and physical foundations for the different systems will be explained. Visual differences between the obtained results will also be discussed. The next part presents several different algorithms for compressing HDR data. In the course of this presentation the implementation of a masking algorithm will also be discussed. Finally, optimal parameters for each of the previously described methods are evaluated and their results will be compared to each other.

Bericht zum Modul Praxis II

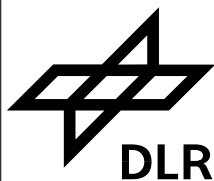
Praxisphase 3: 08. Januar 2018 - 16. März 2018

**Untersuchung verschiedener HDR-Techniken zur Anwendung auf
SAR-Bilder**

von **Beitler, Daniel**

- Matrikelnr.: 9247761 -

- Kurs: TINF16ITIN -



Deutsches Zentrum für
Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Standort: Oberpfaffenhofen

Institut für Hochfrequenztechnik und
Radarsysteme
Abteilung: SAR-Technologie

Dipl.-Math. (Univ.) Jens Fischer

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich
die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter
Verwendung der angegebenen Quellen und
Hilfsmittel angefertigt habe.

Oberpfaffenhofen, der 7. September 2018

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VII
1 Einleitung	1
2 Optische und Radarsysteme	3
2.1 Physikalische Grundlagen	3
2.2 Aufnahmetechniken bei optischen Verfahren	4
2.3 Aufnahmetechniken bei Radarverfahren	5
2.4 Vergleich optischer Bilder mit Radarbildern	9
2.4.1 Signalsättigung	9
2.4.2 Farbgebung	10
3 Verfahren zur HDR-Komprimierung	11
3.1 Standard-Verfahren	11
3.2 Masking	13
3.2.1 Maskengenerierung	13
3.2.2 Bildverschmelzung	14
3.2.3 Implementierung	15
3.3 Drago	17
3.4 Durand	18
3.5 Tumblin und Rushmeier	19
3.6 Reinhard	20
3.7 Reinhard Local	21
3.8 Fattal	22
4 Bestimmung optimaler Parameter zu den einzelnen HDR-Algorithmen	24
4.1 Einfache Parameteränderung durch angepasste Werkzeuge	24
4.2 Bestimmung von optimalen Parametern für ausgewählte Algorithmen	29
4.2.1 Drago	29

4.2.2	Durand	29
4.2.3	Turnblin	29
4.2.4	Reinhard	30
4.2.5	Reinhard Local	30
5	Schlussfolgerung	31
	Literaturverzeichnis	IX

Abbildungsverzeichnis

1	Eine elektromagnetische Welle mit Real- und Imaginärteil	4
2	Schema eines Bayer-Filters und eines Kamerasensors	5
3	Eine Welle wird auf H gesendet und dann zeitgleich auf H und V empfangen. Danach wird auf V gesendet und wieder zeitgleich auf H und V empfangen. Dies ergibt vier Bildkanäle: HH, HV, VH, VV.	6
4	Frontsicht auf den Aufnahmeprozess für Flugzeugradar	7
5	Flugpfad des Flugzeugradars. Pulse werden nach rechts unten gesandt und von dort reflektiert. Der Laufweg des Pulses entspricht seiner Position in der Bildspalte.	8
6	AD-Wandler mit Ein- und Ausgangssignal	8
7	2D-Sinc-Funktion (sternförmig) in optischer Aufnahme (DLR Bremen) und Radaraufnahme (Kaufbeuren-Neugabonz) Quelle: www.dlr.de , www.dlr.de/HR	9
8	Vertikale und horizontale Wellen um einen Baum.	10
9	Das Radarbild eines Kreuzfahrtschiffes in Helgoland mit dem Standardverfahren berechnet.	12
10	Das Radarbild eines Kreuzfahrtschiffes in Helgoland mit dem Maskenverfahren berechnet.	13
11	Das Radarbild eines Kreuzfahrtschiffes in Helgoland mit dem Dragoverfahren berechnet.	17
12	Das Radarbild eines Kreuzfahrtschiffes in Helgoland mit dem Durand-Verfahren berechnet.	19
13	Das Radarbild eines Kreuzfahrtschiffes in Helgoland mit dem Tumblin-Verfahren berechnet.	20
14	Das Radarbild eines Kreuzfahrtschiffes in Helgoland mit dem Reinhard- Verfahren berechnet.	21
15	Das Radarbild eines Kreuzfahrtschiffes in Helgoland mit dem lokalen Reinhard- Verfahren berechnet.	22
16	Das Radarbild eines Kreuzfahrtschiffes in Helgoland mit dem Fattal-Verfahren berechnet.	23
17	Klassendiagramm zum Paket "toolbox"	26

18	Fenster mit Widgets zum Festlegen der Parameter für den Standardalgorithmus und die Skalierung des Bildes	27
19	Darstellung eines zurückgegebenen Bildes mit <code>matplotlib.pyplot</code>	27
20	Sequenzdiagramm zum Verschieben eines Reglers	28

Abkürzungsverzeichnis

DLR	D eutsches Z entrum für L uft- und R aumfahrt e.V.
HR	H ochfrequenztechnik und R adarsysteme
GUI	G raphical U ser I nterface
SAR	S ynthetic A perture R adar
DBFSAR / DBF-SAR	D igital B eam F orming SAR
F-SAR	F lugzeug- SAR
XML	E x(X)tensive M arkup L anguage
PNG	P ortable N etwork G raphics
HDR	H ight D ynamic R ange
LDR	L ow D ynamic R ange
IDL	I nteractive D ata L anguage
STE	SAR-TE chnologie

1 Einleitung

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt: Die achttausend Angestellten des Deutschen Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR) betätigen sich in der Luft- und Raumfahrtforschung für nationale Projekte der Bundesrepublik Deutschland, stehen aber auch in enger Zusammenarbeit mit der europäischen Luft- und Raumfahrtindustrie, sowie den internationalen Raumfahrtagenturen. In diesem Rahmen werden Forschungsprojekte aus den beispielhaften Themenkomplexen des Umweltschutzes, der Astronomie und der Erdbeobachtung realisiert [1].

Aktuell ist der Standort Oberpfaffenhofen mit fast zweitausend Mitarbeitern der größte des DLR. Hier wird unter anderem auf den Gebieten der Robotik, der Erdbeobachtung und der Kommunikation geforscht und entwickelt [2].

Das Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme: Das von Prof. Dr.-Ing. habil. Alberto Moreira geleitete Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme (HR) befasst sich mit seinen zirka 150 Mitarbeitern mit Projekten zu den Themen Mikrowellentechnik, Radartechnik, unter Anderem auch zu Aufklärung und Sicherheit. Dabei liegt der Fokus auf der Entwicklung fortschrittlicher Methoden im Bereich der abbildenden Radarsysteme mit synthetischer Apertur (SAR - Synthetic Aperture Radar) [3] [4].

Die Abteilung für SAR Technologie: Innerhalb des Instituts HR werden in der Abteilung SAR Technologie unter der Leitung von Prof. Dr. Andreas Reigber flugzeuggestützte Radarsysteme entwickelt. Dabei wird auch die Ver- und Bearbeitung von Radardaten behandelt und stetig verbessert. Derzeit befinden sich zwei flugzeuggestützte Radarsysteme im Einsatz: F-SAR (P-, L-, S-, C- und X-Band) sowie DBFSAR (X-Band mit sehr hoher Auflösung und der Fähigkeit zur digitalen Strahlformung) [5].

Die Aufgabe: Bei der Verwendung von aktuellen SAR-Systemen wird ein hoher Dynamikumfang von $N \times 32$ Bit/Bildpunkt verwendet, wobei N für die verschiedenen Bildkanäle steht.¹ Um SAR-Daten interpretierbar und leichter verständlich zu machen, müssen sie zur Darstellung in übliche Medien mit etabliertem Dynamikumfang von 3×8 Bit/Bildpunkt,

¹Bei üblichen, vergleichbaren Prozessen in der Optik werden typischerweise drei Kanäle (rot, grün und blau) mit je 8 Bit pro Bildpunkt verwendet.

wie er auch bei den Formaten JPG und PNG verwendet wird, transformiert werden. Dabei soll ein farbiges Bild mit einer großen Farbbrillanz, einem hohen Kontrast und einem für Radarabbildungen üblichen Informationsgehalt entstehen. Um dies zu ermöglichen, sollen in dieser Arbeit nun verschiedene Verfahren zur Dynamikreduktion von 32 Bit auf 8 Bit, die in der Programmiersprache Python umgesetzt wurden, gegeneinander verglichen werden. Im Zuge dessen sollen auch eine neue Idee zur Dynamikreduktion in Python umgesetzt werden.

2 Optische und Radarsysteme

Bevor die Anwendung von Algorithmen aus dem Bereich der optischen Bildgebung auf Daten aus dem Radarbereich erfolgen kann, sollen hier noch die Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen Radar und Optik herausgestellt und betrachtet werden.

Folglich wird in diesem Kapitel zuerst auf die grundlegenden physikalischen Prinzipien von Radar und Optik eingegangen und anschließend die jeweilige Aufnahmemethode, sowie die im finalen Bild sichtbaren Unterschiede erklärt.

2.1 Physikalische Grundlagen

Sowohl Radar, als auch die Optik basieren auf dem Modell der elektromagnetischen Wellen. Deren Energie schwingt bei der Ausbreitung im freien Raum zwischen elektrischer und magnetischer Energie. Dabei kann man jedoch immer nur den elektrischen oder den magnetischen Anteil des Signals messen, die beide eine um 90° zueinander verschobene Sinuskurve beschreiben. Zusammen ergibt das eine, wie in Abbildung 1 dargestellte, spiralförmige Wellenausbreitung im freien Raum.

Das menschliche Auge kann dabei nur einen kleinen Bruchteil des elektromagnetischen Spektrums wahrnehmen: Wellenlängen im Bereich von Nanometern. Die unterschiedlichen Reflektions- und Absorptionseigenschaften von Oberflächen führen nun zur Wahrnehmung von "Farbe".

Die in dieser Arbeit diskutierten Wellenlängen des Radars liegen jedoch im Bereich von 3 cm (X-Band), 5,6 cm (C-Band), 9 cm (S-Band), 23 cm (L-Band) und 64 cm (P-Band). Einen Eindruck von Farbe gewinnt man dabei, indem man die unterschiedlichen Rückstreuungseigenschaften von Oberflächen bezüglich polarisiert ausgesendeter Wellen nutzt. Dies wird später noch genauer beschrieben.

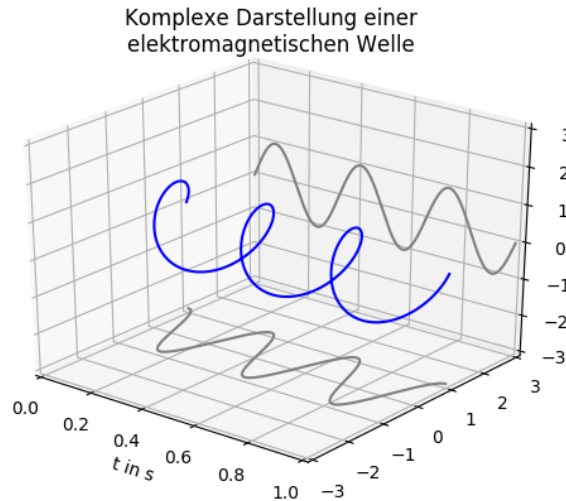


Abbildung 1: Eine elektromagnetische Welle mit Real- und Imaginärteil

2.2 Aufnahmetechniken bei optischen Verfahren

Optische Aufnahmegeräte (auch Kameras genannt) bestehen aus einem Sensor¹ für die Bildaufnahme und verschiedenen weiteren Komponenten aus der Optik, die für die Vergrößerung von Objekten oder Ähnlichem benutzt werden. In dieser Arbeit liegt aber das Augenmerk auf dem Kamerasensor und seiner Methode, farbige Bilder zu erstellen.

Ein solcher Sensor besteht aus kleineren Lichtsensoren, deren Anzahl durch die maximale Auflösung der Kamera vorgegeben wird. Hierbei kann man sich vorstellen, dass die Anzahl der Lichtsensoren der Anzahl der Pixel bei maximaler Auflösung entspricht.

Diese Lichtsensoren haben aufgrund ihrer Konstruktionsweise lediglich die Fähigkeit die Helligkeit des gesamten auf sie einwirkenden Lichtes zu messen - eine Funktion zum Erkennen und Aufnehmen von Farben fehlt hierbei. Aus diesem Grund wird oft ein sogenannter Bayer-Sensor² verwendet. In diesem wird jedem Lichtsensor ein Farbfilter für eine der drei Grundfarben (Grün, Blau, Rot) vorgeschaltet. Folglich erreichen den Sensor nur noch die Lichtanteile für die durch den Filter definierte Farbe (z.B. die roten Anteile bei einem roten Farbfilter) und

¹In diesem Fall handelt es sich um digitale Geräte, analoge Kameras ersetzen den Sensor durch den Film.

²Auch Bayer-Matrix oder Bayer-Filter, nach ihrem Erfinder B. E. Bayer genannt.

werden als Helligkeitswerte aufgezeichnet (siehe Abbildung 2).

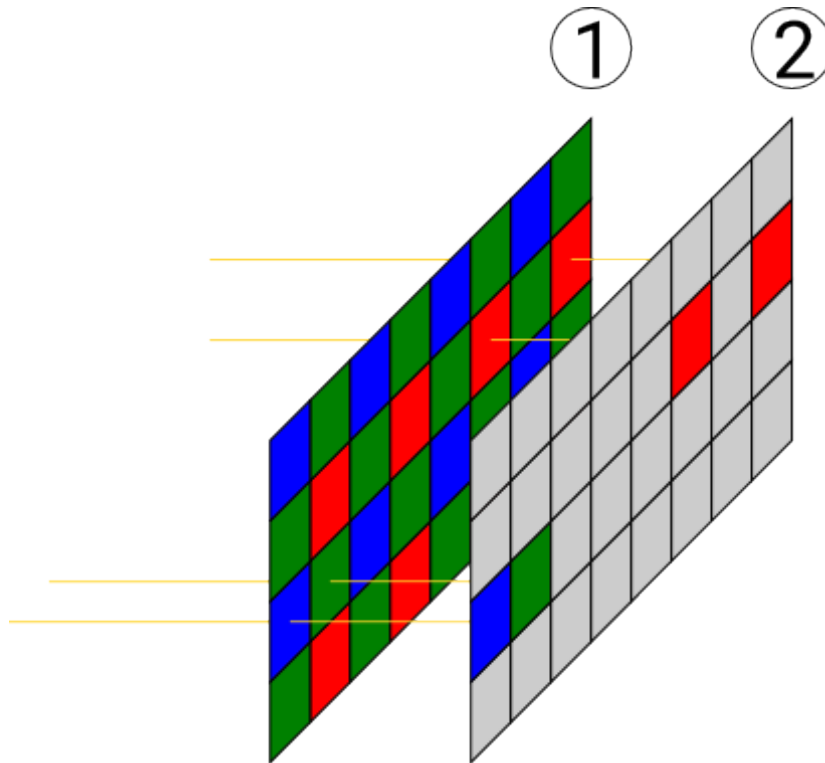


Abbildung 2: Schema eines Bayer-Filters und eines Kamerasensors

In diesem Schema ist ① der Bayer-Filter und ② der Photosensor. Hierbei wird auf dem Sensor angezeigt, welche Farben aktuell aktiviert sind und aufgezeichnet werden. Sobald die Aufnahme beendet ist wird aus den aufgezeichneten Werten das finale Bild berechnet.

2.3 Aufnahmetechniken bei Radarverfahren

Im Gegensatz zu Photokameras sind Radarsensoren keine Felder von Einzelsensoren, sondern bestehen im einfachsten Fall aus einer Antenne mit zwei Schlitzen (horizontal und vertikal angeordnet), die abwechselnd einen kurzen elektromagnetischen Wellenpuls über den H-Schlitz und den V-Schlitz senden (Abbildung 3). Nach jedem Senden wird gewartet bis die verschiedenen Echos desselben Pulses von ganz nah bis ganz fern zu derselben Antenne zurückgekehrt sind. Die Welle wird dabei jeweils zeitgleich auf dem H-Schlitz und dem

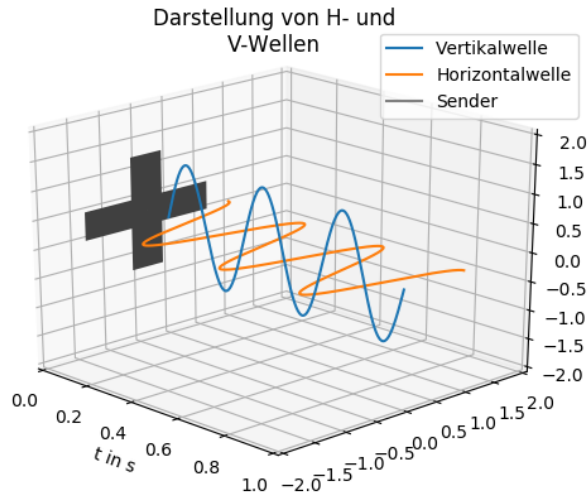


Abbildung 3: Eine Welle wird auf H gesendet und dann zeitgleich auf H und V empfangen. Danach wird auf V gesendet und wieder zeitgleich auf H und V empfangen. Dies ergibt vier Bildkanäle: HH, HV, VH, VV.

V-Schlitz empfangen. Digitalisiert ergeben diese nun jeweils eine Spalte des digitalen Bildes, bei der sich das am schnellsten zurückgekehrte Pixel ganz oben in der Bildspalte befindet und das zuletzt zurückgekehrte Pixel ganz unten. Die nächste Spalte ergibt sich aus der Vorwärtsbewegung des Sensors und dem Senden und Empfangen des nächsten Pulses. Alle Spalten zusammen ergeben am Ende das digitale Bild.

Ein vereinfachtes Schema für die Radaraufnahme mit Flugzeugen wird in Abbildung 4 dargestellt. Hierbei wird von einem Sender in einem Flugzeug (①) aus ein sogenannter Chirp (②), d.h. ein breitbandiges Signal mit einer festgelegten Dauer, gesendet. Danach wird dieselbe Antenne auf Empfang geschaltet. Anfangs- und Endzeitpunkt des Empfangsfensters bestimmen dabei, welcher Streifen am Boden abgebildet wird. Hierbei werden nur Signalreflexionen für die mit ③ markierten Orte erfasst, da diese innerhalb des Empfangssignals liegen, ④ und ⑤ liegen außerhalb dieses "Aufnahmebereiches" und werden nicht erfasst.

Die reflektierten elektromagnetischen Wellen werden gleichzeitig vertikal und horizontal empfangen. Dadurch ergeben sich, durch den Transmitter (horizontal oder vertikal) bestimmt, die folgenden Sende/Empfangs-Paarungen, sofern man für horizontales Senden und Empfangen

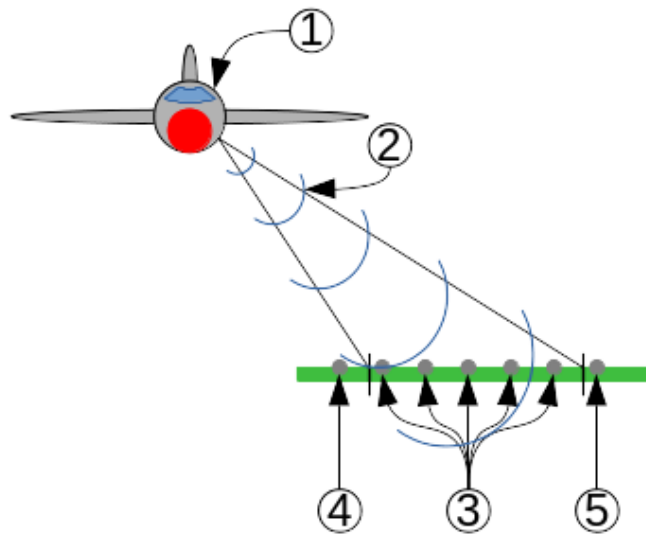


Abbildung 4: Frontsicht auf den Aufnahmeprozess für Flugzeugradar

den Buchstaben "H" und für vertikales Senden und Empfangen "V" verwendet:

Sendemethode	Empfangsmethode	Bezeichnung
Horizontal	Horizontal	HH
Horizontal	Vertikal	HV
Vertikal	Horizontal	VH
Vertikal	Vertikal	VV

Hierbei kann man nach der Theorie der elektromagnetischen Wellen in der Physik annehmen, dass, sofern das Radargerät korrekt kalibriert wurde, die Kanäle HV und VH dieselben Werte enthalten. Infolgedessen verbleiben nunmehr die drei Kanäle HH, HV und VV, die man üblicherweise zu einem RGB-Bild kombiniert. Der Kanal HV muss aufgrund seiner physikalisch geringeren Leistung um einen Faktor von üblicherweise 1,4 bis 2 verstärkt werden.

In Abbildung 5 wird der Flugpfad (2) des Flugzeugs (1) dargestellt. Dabei wird für jede Bildspalte (4) jeweils der ausgesendete Chirp und das eingehende, reflektierte Signal dargestellt (3).

Diese Signale werden als Stream in den in Abbildung 6 dargestellten Analog-Digital-Wandler gegeben. Dieser Wandler (2) greift in regelmäßigen Abständen diskrete Werte vom

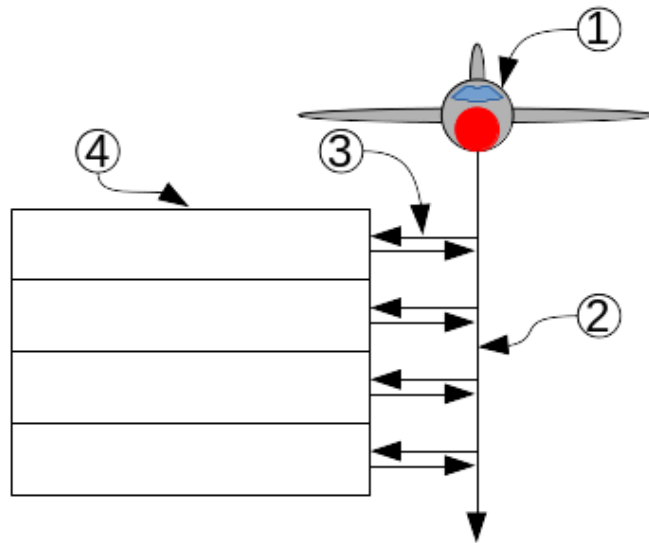


Abbildung 5: Flugpfad des Flugzeugradars. Pulse werden nach rechts unten gesandt und von dort reflektiert. Der Laufweg des Pulses entspricht seiner Position in der Bildspalte.

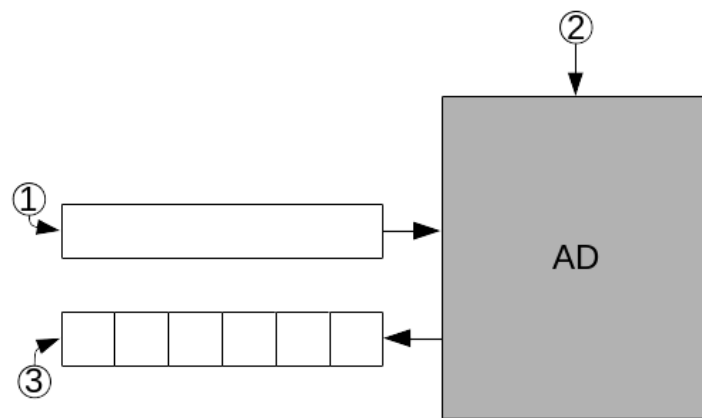


Abbildung 6: AD-Wandler mit Ein- und Ausgangssignal

eingehenden analogen Signal (①) ab und gibt als Resultat eine Bildspalte (③) zurück.

2.4 Vergleich optischer Bilder mit Radarbildern

2.4.1 Signalsättigung

Zwei Aufnahmen, eine aus der Optik und eine aus bildgebenden Verfahren im Radar, sind in Abbildung 7 dargestellt. Auch wenn das abgebildete Objekt nicht identisch ist, so sind diese Aufnahmen dennoch vergleichbar hinsichtlich einiger Eigenheiten.



Abbildung 7: 2D-Sinc-Funktion (sternförmig) in optischer Aufnahme (DLR Bremen) und Radaraufnahme (Kaufbeuren-Neugabonz)
Quelle: www.dlr.de, www.dlr.de/HR

In beiden Bildern in Abbildung 7 sind zweidimensionale Sinc-Funktionen (weiße "Sterne") erkennbar. In der Optik entstehen diese Stellen genau wie bei Radarabbildungen durch Signalsättigung, d.h. bei weiter ansteigendem analogen Signal ist der maximale diskrete Wert bereits erreicht. In der Optik, wie auch im Radar, kommt eine solche Sättigung durch Blendung zustande, d.h. das Sonnenlicht oder das ausgesendete Radarsignal wird auf einer

sehr glatten Fläche zum Sensor derart stark zurückgespiegelt, so dass es den Maximalwert erreicht.

2.4.2 Farbgebung

Während optische Sensoren von Menschen erkennbare Farben abbilden, so haben Farben in Radarbildern eine andere Bedeutung. Wie in Kapitel 2.3 gezeigt, werden zur Farbgebung in Radaraufnahmen Kanäle verwendet, die auf unterschiedlich polarisierten Wellen beruhen.

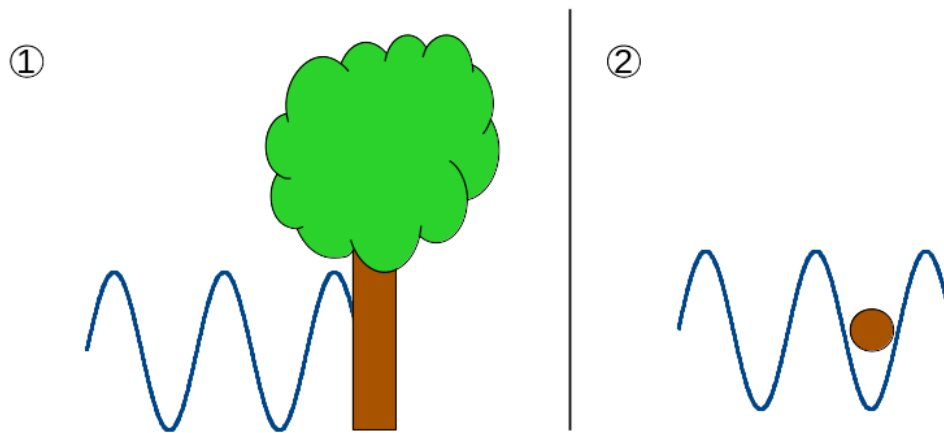


Abbildung 8: Vertikale und horizontale Wellen um einen Baum.

Folglich basiert die Farbe in Radarbildern nicht auf von Menschen erkennbaren Farben, sondern einer Farbgebung, die aufgrund der Struktur des betrachteten Objekts zustande kommt. Dies basiert, wie in Abbildung 8 dargestellt wird, darauf, dass elektromagnetische Wellen von einem Objekt jeweils parallel (vertikal oder horizontal) zur Ausbreitungsebene reflektiert werden (① und ②).

3 Verfahren zur HDR-Komprimierung

Die Abteilung SAR-Technologie verwendet aktuell ein allgemein übliches Standardverfahren zur Behandlung von Daten mit einem hohen dynamischen Umfang. Im Gegensatz dazu existieren bereits in der Optik einige etablierte Methoden für denselben Zweck, die auf optische Bilder optimiert sind. Einige davon wurden in Hydra, einer frei zugänglichen Softwarebibliothek (GitHub) von Tatsuya Yatagawa (Tatsy), implementiert und werden im Folgenden verwendet [6]. Auch gibt es ein Verfahren, welches unter Verwendung einer Maske ein Bild aus zwei verschieden behandelten Bildern erstellt. Im Folgenden wird die Funktionsweise der Algorithmen vorgestellt, im Fall des Maskenalgorithmus auch die Implementation, und zu jeder Funktion wird ein mit optimierten Parametern erzeugtes Bild gezeigt. Dabei kann zwischen globalen und lokalen Operatoren unterschieden werden. Globale Algorithmen behandeln alle vorkommenden Pixel exakt gleich, das bedeutet, dass sie aber keine lokalen Häufungen von dunkleren, beziehungsweise helleren Bildpunkten gesondert behandeln können und so unter Umständen Informationen verlorengelassen. Dafür sind globale Operationen meist um einiges schneller als lokal behandelnde Algorithmen, die häufig einen Filter (zum Beispiel zwei Gaußfunktionen mit verschiedenen Radien) verwenden, um Regionen mit höherem oder geringerem Dynamikumfang zu identifizieren. Ein weiterer Vorteil globaler Verfahren ist, dass diese die mühsam erarbeitete Radar-Grauwert-Kalibrierung weitestgehend erhalten.

3.1 Standard-Verfahren

Der in der in der Radartechnik üblicherweise verwendete Algorithmus zum Visualisieren von Radardaten, in diesem Fall als *Standardalgorithmus* oder *Standard* bezeichnet, basiert auf einer Gammakorrektur von 0,7 und dem Kappen von Werten über einem bestimmten Wert, üblicherweise dreimal dem Mittelwert des Bildes. Hierfür sind die Parameter $p = 0,7$ (power) und $bf = 3$ (brightness factor) vom Anwender modifizierbar.

$$L_{kor} = L_w^p \quad (3.1)$$

Die in Gleichung 3.1 beschriebene Funktion potenziert einen Ausgangskanal, hier L_w genannt, mit dem Exponenten p . Üblicherweise setzt man $p = 0,7$. Ein weiterer Parameter wird in

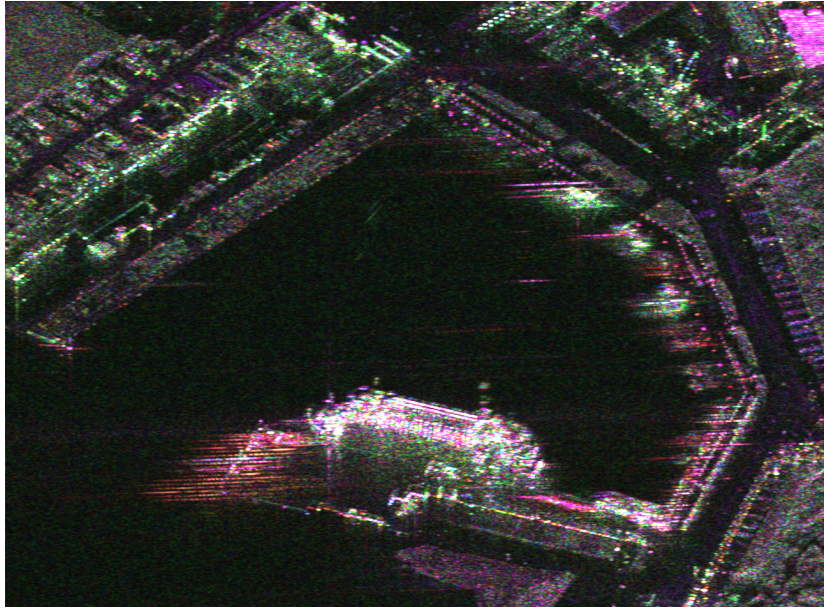


Abbildung 9: Das Radarbild eines Kreuzfahrtschiffes in Helgoland mit dem Standardverfahren berechnet.

Gleichung 3.2 angewendet.

$$maxval = mean(L_{korr}) \cdot bf \quad (3.2)$$

Dabei wird aus dem Mittelwert von L_{korr} mithilfe von bf der Wert für das Kappen der Dynamik bestimmt. Der Nutzer hat die Möglichkeit, den Parameter bf festzulegen und bestimmt dadurch, ab welchem Vielfachen des Mittelwertes des gamma-korrigierten Bildes die Dynamik gekappt wird. Daraufhin werden alle Werte in L_{korr} , die über dem Wert $maxval$ liegen durch $maxval$ ersetzt.

$$L_{korr}[data > maxval] = maxval \quad (3.3)$$

Bei dreikanaligen Bildern (rot, grün, blau) wird der Mittelwert auf dem ersten Kanal ermittelt und dann mit denselben p - und bf -Parametern auf alle drei Farbkanäle angewandt.

3.2 Masking

Das Masking-Verfahren kann als eine Erweiterung des zuvor beschriebenen Standardverfahrens gesehen werden.

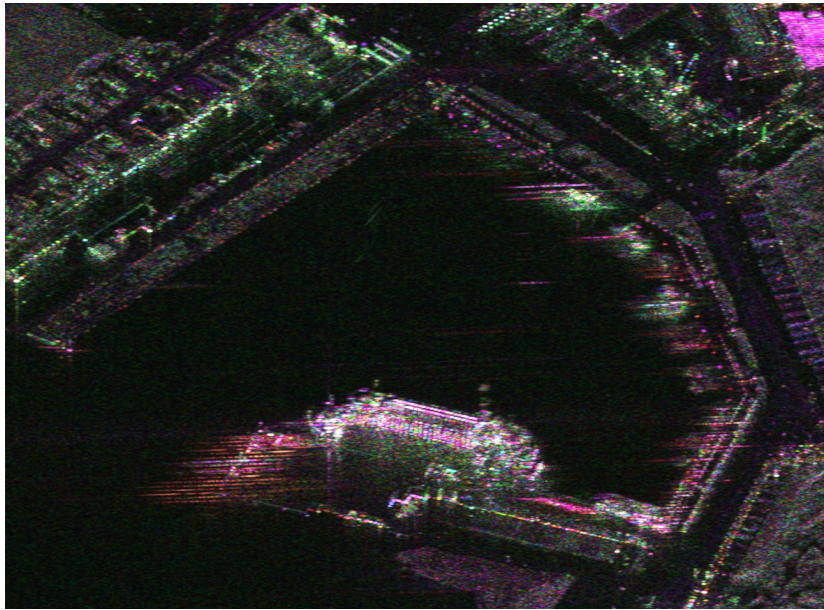


Abbildung 10: Das Radarbild eines Kreuzfahrtschiffes in Helgoland mit dem Maskenverfahren berechnet.

Einziger Unterschied ist, dass die gesättigten Bereiche des durch Standardverfahren erzeugten Bildes (Maximalwert = weiß) durch ungesättigte Bildinhalte (Grauwerte, die nicht dem Maximalwert entsprechen) ersetzt werden. Dazu muss ein zweites ungesättigteres Bild I_u erzeugt werden, das nur an den Stellen des ersten Bildes I_g erscheint, die zuvor gesättigt waren. Zu diesem Zweck wird eine Maske erstellt, die die gesättigten Bereiche des Ursprungsbildes erfasst. Anschließend werden die beiden Bilder mittels dieser fusioniert.

3.2.1 Maskengenerierung

Berechnung der Maske Aus dem gesättigten Bild wird eine Maske mit den Werten 1 (weiß) und 0 (schwarz) erstellt. Dafür werden zuerst die verschiedenen Kanäle (rot, grün,

blau)¹ des gesättigten Bildes L_d zur Summe L_t addiert (Gleichung 3.4). Diese Summe wird durch ihren größten Wert L_{tmax} geteilt. Dadurch erhält man eine zweidimensionale Matrix m_{orig} , die Werte zwischen 0,0 und 1,0 enthält (Gleichung 3.5). Dabei sind alle Inhalte, deren Wert gleich 1,0 ist, gesättigte Stellen im Ursprungsbild.

$$L_t = L_{dr} + L_{dg} + L_{db} \quad (3.4)$$

$$m_o = L_t / L_{tmax} \quad (3.5)$$

Im darauf folgenden Schritt werden alle Werte, die kleiner als 1,0 (weiß) sind auf 0,0 (schwarz) gesetzt.

Artefaktentfernung Nun ist eine Maske vorhanden, die die Bereiche im Radarbild mit hoher Helligkeit markiert. Da hierbei auch kleine Bereiche erfasst werden, hätte das finale Bild einige Stellen, die unregelmäßig aussehen und dem Betrachter unangenehm auffallen würden. Dies macht die Verwendung eines Algorithmus nötig, der einen solchen "Pfeffer" entfernt.

Dabei werden alle Werte der Maske (ausgenommen die am Rand) daraufhin geprüft, ob sie den Wert 1,0 haben. Wenn dies der Fall ist, so wird die Summe aller Werte (einschließlich des vorher schon geprüften) in einem 3x3-Feld um den Prüfwert berechnet. Anschließend wird diese mit einem vorher festgelegten Wert verglichen. Dieser legt fest, was die minimale Summe in einem solchen 3x3-Feld sein muss. Ist die Summe der Werte kleiner oder gleich dem Vergleichswert, so wird der Prüfpixel in der Maske auf 0,0 (schwarz) gesetzt.

Invertierung der Maske Anschließend wird eine invertierte Maske m_{inv} erstellt, indem m_{orig} von 1 subtrahiert wird (Gleichung 3.6).

$$m_{inv} = 1 - m_{orig} \quad (3.6)$$

3.2.2 Bildverschmelzung

Mit den nun generierten Masken m_{orig} und m_{inv} kann nun das finale Bild berechnet werden. Dabei wird, wie es in Gleichung 3.7 dargestellt ist, das gesättigte Bild I_g mit der invertierten Maske m_{inv} und das ungesättigte Bild I_u mit der originalen Maske multipliziert. Dadurch

¹ L_{dr} , L_{dg} und L_{db}

erhält das Originalbild an jeder gesättigten Stelle ein "Loch". Außerdem wird ein zu diesen Loch passender "Pin" in dem ungesättigten Bild erzeugt, indem dort jeder Inhalt, der im Originalbild nicht gesättigt ist entfernt wird.

$$I_f = I_g \cdot m_{inv} + I_u \cdot m_{orig} \quad (3.7)$$

3.2.3 Implementierung

Hauptalgorithmus In dem Quellcode 1 wird das zentrale Gerüst des Maskenalgorithmus dargestellt. Für das Ausführen dieser Funktion werden das HDR-Bild (*hdr_img*), die Helligkeit für das Grundbild (*brightness_start*), idealerweise ist diese dieselbe wie der später festgelegte kleinere Helligkeitswert), der größere Helligkeitsfaktor *brightness_high*, der kleinere Helligkeitsfaktor *brightness_low*, der Vergleichswert für das Entfernen von Pixeln (*remove_pixel_value*) und die Potenz (*power*) benötigt (Zeilen 1 & 2).

In Zeile 5 wird das Grundbild mithilfe des zuvor in Kapitel 3.1 gezeigten Algorithmus generiert. Anschließend wird die zweidimensionale Maske aus dem dreidimensionalen LDR-Bild erstellt. Dabei erfolgt zuerst, wie schon zuvor erwähnt eine Addition der drei Kanäle des Bildes (Zeile 9). Daraufhin wird diese Summe durch den größten Wert in dieser geteilt und alle Werte kleiner als 1,0 durch 0,0 ersetzt (Zeilen 10 & 11). In Zeile 14 erfolgt die Ausführung der "Pepper"-Funktion (die später noch gezeigt wird) zum Entfernen von Artefakten. Dabei werden die aktuelle Maske und der Vergleichswert übergeben. Die Rückgabe wird verwendet, um die invertierte Maske (Zeile 16) zu erzeugen. Weiterhin wird mit den beiden übergebenen Helligkeitsfaktoren (groß/klein) jeweils ein Bild erzeugt (Zeilen 19 & 20). Das finale Bild wird in den Zeilen 22 bis 24 erstellt, wobei jeder Kanal des Bildes separat behandelt wird.

```

1 def hdr_masking(hdr_img, brightness_start=3, brightness_high=6,
2                 brightness_low=3, remove_pixel_value=2.0, power=0.5):
3
4     # Generate the first LDR-Image
5     ldr_img_1 = standard(hdr_img, bf=brightness_start, power=power)
6
7     # Generate a 2d-Mask (black & white, white: white spots in the
8         original
9         LDR-Image)
10    mask_2d = ldr_img_1[:, :, 0] + ldr_img_1[:, :, 1] + ldr_img_1[:, :, 2]
11    mask_2d = mask_2d/np.max(mask_2d)

```

```
11     mask_2d[mask_2d < 1.0] = 0.0
12
13     # Remove pepper
14     mask_2d = pepper(mask_2d, remove_pixel_value)
15
16     inv_mask = 1 - mask_2d
17
18     # Generate the final image
19     ldr_img_full = standard(hdr_img, bf=brightness_high, power=power)
20     ldr_img_half = standard(hdr_img, bf=brightness_low, power=power)
21
22     img = np.zeros((hdr_img.shape[0], hdr_img.shape[1], 3))
23     for i in range(3):
24         img[:, :, i] = ldr_img_full[:, :, i]*mask_2d + ldr_img_half[:, :, i]*
                inv_mask
25
26     # Return the combination from both images
27     return ldr_img_full + ldr_img_half
```

Quellcode 1: Hauptfunktion für das Masking

Artefaktentfernung Der Quellcode 2 zeigt die Funktion, die der Maskenalgorithmus verwendet, um Artefakte zu entfernen. Dabei müssen ein Eingangsfeld (*arr*) und ein Vergleichswert (*remove_pixel_val*) bereitgestellt werden (Zeile 1). Anschließend wird, mit Ausnahme des Randes jeder Wert des Feldes überprüft (Zeilen 8 & 9). Wenn diese Wert gleich 1,0 ist (Zeile 12), so wird überprüft, ob die Summe aller Werte in einem 3x3-Bereich um diesen Wert kleiner oder gleich dem Vergleichswert ist (Zeile 16). Ist dem so, so wird der aktuelle Wert auf 0,0 gesetzt (Zeile 17).

```
1 def pepper(arr, remove_pixel_value):
2
3     # Sets the working array and gets the shape of it
4     war = arr
5     shp = arr.shape
6
7     # Goes through x and y
8     for x in range(1, shp[0]-1):
9         for y in range(1, shp[1]-1):
10
```

```
11         # Checks if the targeted value is 1.0
12         if war[x,y] == 1.0:
13
14             # Checks if the total sum of a 3*3 area around the
               targeted
15             # value is remove_pixel_value or less
16             if sum(sum(war[x-1:x+2,y-1:y+2])) <= remove_pixel_value:
17                 war[x,y] = 0.0
18
19     return war
```

Quellcode 2: "Pepper"-Funktion für das Masking

3.3 Drago

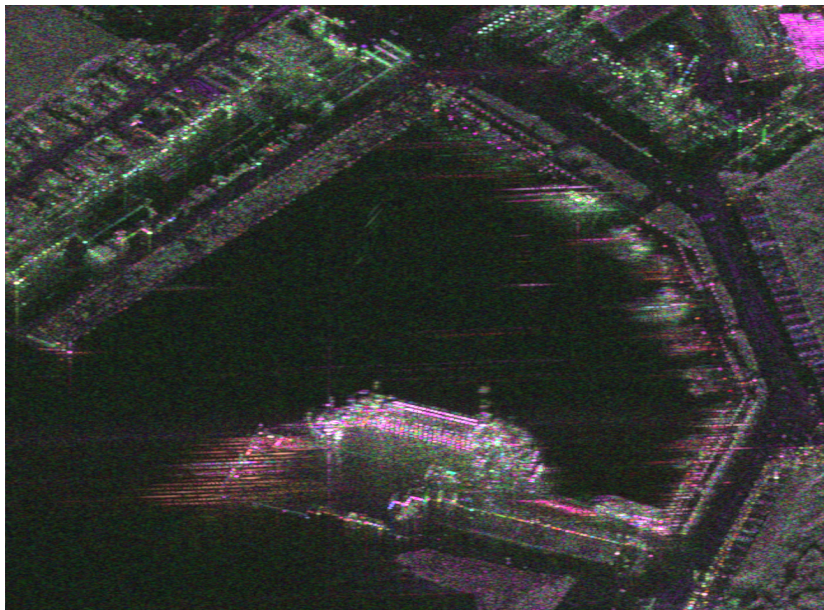


Abbildung 11: Das Radarbild eines Kreuzfahrtschiffes in Helgoland mit dem Dragoverfahren berechnet.

Das Mapping-Verfahren nach Drago [7] ist ein globaler Algorithmus, der auf der menschlichen Eigenschaft logarithmisch zu sehen aufbaut. Dabei ist er primär auf eine schnelle

Abarbeitung des Rechenprozesses ausgelegt. Wie bei vielen anderen Algorithmen wird dabei erst die Leuchtdichte des Bildes (das ist eine Matrix, die für jeden Pixel die Leuchtkraft, zusammengesetzt aus den Werten für rot, grün und blau, beinhaltet) berechnet. Anschließend wird die in Gleichung 3.8 dargestellte Funktion auf jeden Pixel angewandt.

$$L_d = \frac{L_{dmax} \cdot 0.01}{\log_{10}(L_{wmax} + 1)} \cdot \frac{\log(L_w + 1)}{\log\left(2 + \left(\left(\frac{L_w}{L_{wmax}}\right)^{\frac{\log(b)}{\log(0.5)}}\right) \cdot 8\right)} \quad (3.8)$$

Dabei sind lediglich L_{dmax} und b veränderlich. In Hydra werden diese als $ldmax$, beziehungsweise p bezeichnet. L_{dmax} ist hierbei ein Faktor, der die Ausgabe an des entsprechende Medium anpasst. Der Parameter b wird hingegen in der sogenannten Bias-Funktion (Gleichung 3.9), sowie bei der Berechnung der maximalen und der generellen Leuchtdichte der Szene verwendet.

$$bias_b(t) = t^{\frac{\log(b)}{\log(0.5)}} \quad (3.9)$$

3.4 Durand

Durand [8] schlägt in seinem Paper das Aufteilen eines HDR-Bildes in zwei Ebenen vor, die nach ihrer Verarbeitung wieder kombiniert werden. Diese werden als Detailebene und Basisebene bezeichnet. Der Kontrast der zuletzt genannten wird reduziert. Dabei wird über bilaterales Filtern Rauschen unterdrückt. Bei der Implementierung in Hydra kann hierbei nur der Parameter *target_contrast*, der bestimmt auf welchen Kontrast die Basisebene komprimiert wird, verändert werden.

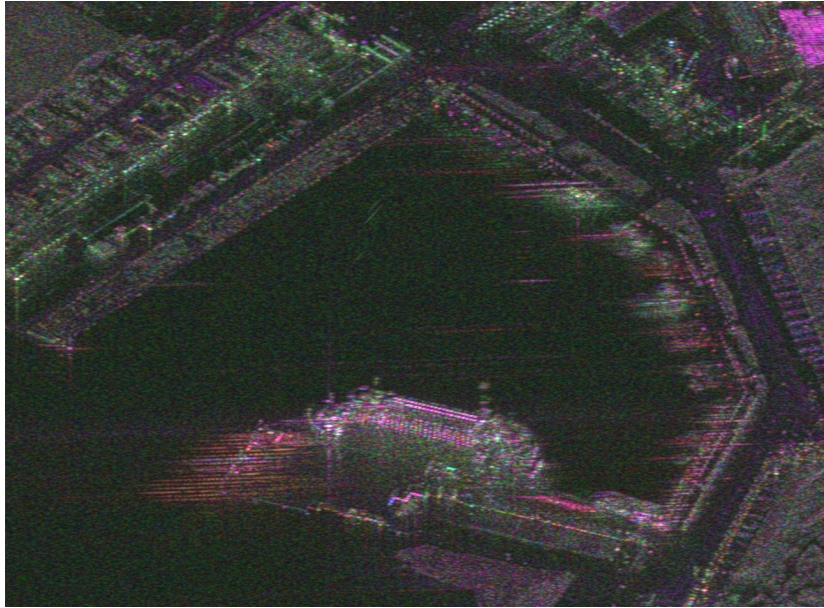


Abbildung 12: Das Radarbild eines Kreuzfahrtschiffes in Helgoland mit dem Durand-Verfahren berechnet.

3.5 Tumblin und Rushmeier

Jack Tumblin und Holly Rushmeier [9] basieren ihren 1993 erschienen Algorithmus auf der Eigenschaft des menschlichen Auges, räumliche und zeitliche Änderungen in der Strahldichte um einiges besser zu verarbeiten als absolute Werte.

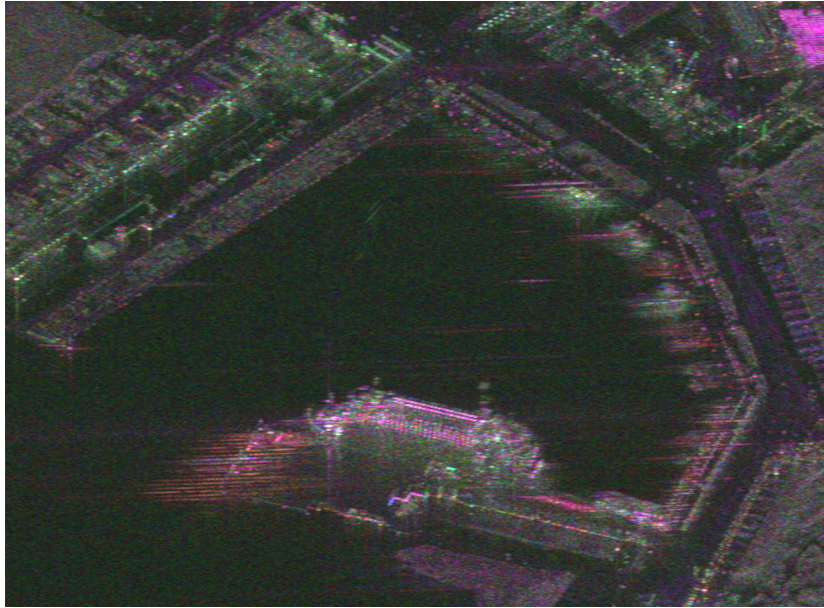


Abbildung 13: Das Radarbild eines Kreuzfahrtschiffes in Helgoland mit dem Tumblin-Verfahren berechnet.

3.6 Reinhard

Erik Reinhard schlägt in seinem Artikel [10] einen Algorithmus zur Verarbeitung von HDR-Daten vor, der auf dem von Ansel Adams² veröffentlichten Zonensystem beruht. In diesem System werden bestimmte Zonen mit einem gewissen Dynamikumfang festgelegt. Darauf baut Erik Reinhard auf und entwickelt die in Gleichung 3.10 dargestellte Funktion für die Leuchtkraft jedes durch x und y bestimmten Pixels.

$$L_d(x, y) = \frac{L(x, y) \cdot \left(1 + \frac{L(x, y)}{L_{white}^2}\right)}{1 + L(x, y)} \quad (3.10)$$

Dabei ist $L(x, y)$ die skalierte Leuchtkraft jedes Pixel und wird über die Funktion in Gleichung 3.11 berechnet. Hierbei repräsentiert $L_w(x, y)$ die Leuchtkraft der Pixel im Ausgangsbild, $\bar{L}_w$ die durchschnittliche Leuchtkraft, basierend auf einer logarithmischen Funktion und a ist ein festgelegter Grauwert (mittelgrau).

²Amerikanischer Photograph, 1902 bis 1984 [11]

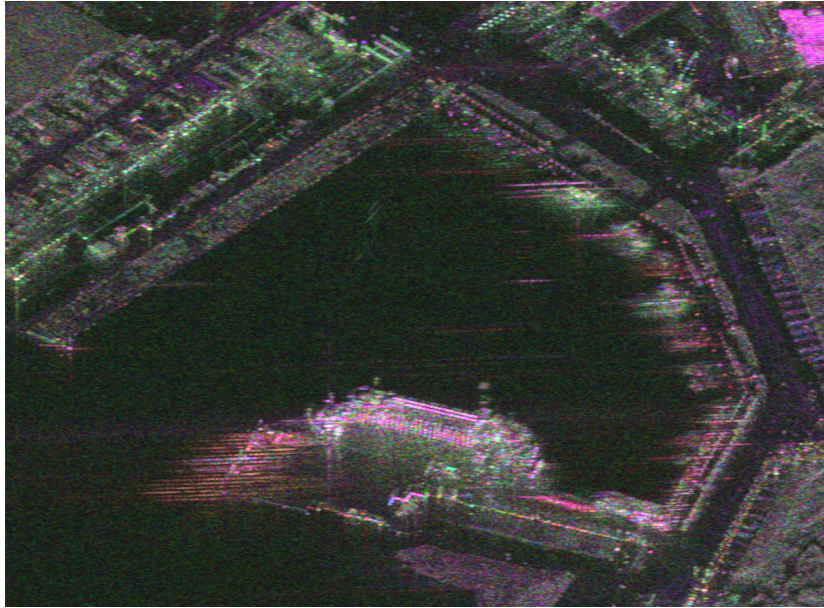


Abbildung 14: Das Radarbild eines Kreuzfahrtschiffes in Helgoland mit dem Reinhard-Verfahren berechnet.

$$L(x, y) = \frac{a}{L_w} L_w(x, y) \quad (3.11)$$

In Gleichung 3.10 wird außerdem der Parameter L_{white} verwendet. Über den Wert dieses Parameters kann die geringste Leuchtkraft, die auf weiß gesetzt wird bestimmt werden [10]. In der Implementierung in Hydra wird L_{white} aus der Leuchtkraft der Eingangsdaten berechnet.

3.7 Reinhard Local

Reinhard stellt auch einen lokalen Algorithmus, der auf dem bekannten Dodge-and-Burn-Verfahren beruht, vor [10]. Basierend auf zwei überlappenden Gaußfunktionen, um Kanten zu erkennen, ist dieser eine lokale Umsetzung des Reinhard-Algorithmus. Hierbei werden über das Anwenden verschieden großer Gaußfunktionen Regionen identifiziert, auf die der Reinhard-Algorithmus angewendet wird.

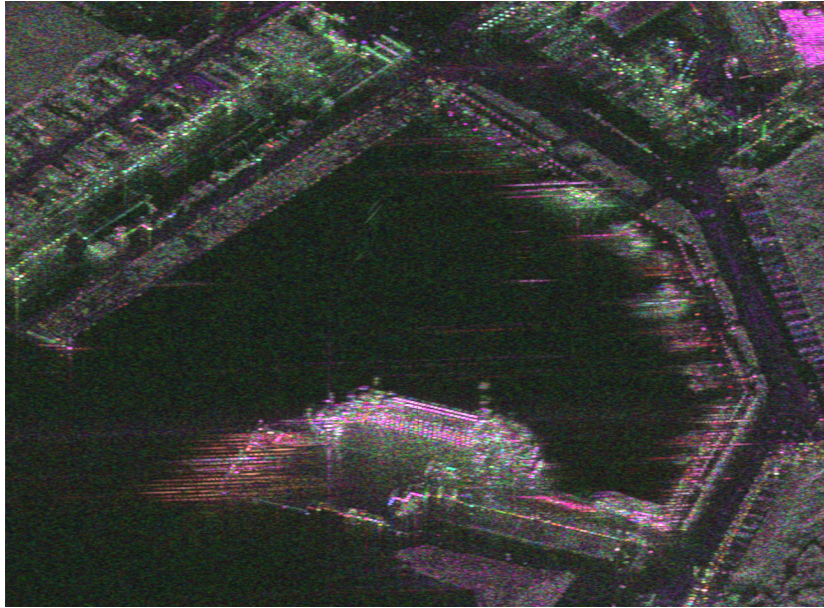


Abbildung 15: Das Radarbild eines Kreuzfahrtschiffes in Helgoland mit dem lokalen Reinhard-Verfahren berechnet.

3.8 Fattal

Raanan Fattal [12] baut sein Verfahren, wie auch schon Jack Tumblin und Holly Rushmeier (siehe Kapitel 3.5), auf dem nicht-absoluten und lokalem Sehen des menschlichen Auges auf. Dabei besteht die Grundidee, große Unterschiede zu entfernen und Details beizubehalten. Dafür wird der Gradient³ der Leuchtstärke verwendet und mit einer Dämpfung verrechnet.

$$G(x, y) = \nabla H(x, y) \cdot \Phi(x, y) \quad (3.12)$$

In Gleichung 3.12 ist $\nabla H(x, y)$ der Gradient und $\Phi(x, y)$ die Dämpfung des Gradienten. Hierbei ist Φ abhängig von dem Detektionslevel.

³Der Gradient kann als eine Art Ableitung gesehen werden und zeigt in diesem Fall Kanten und Differenzen im Bild.

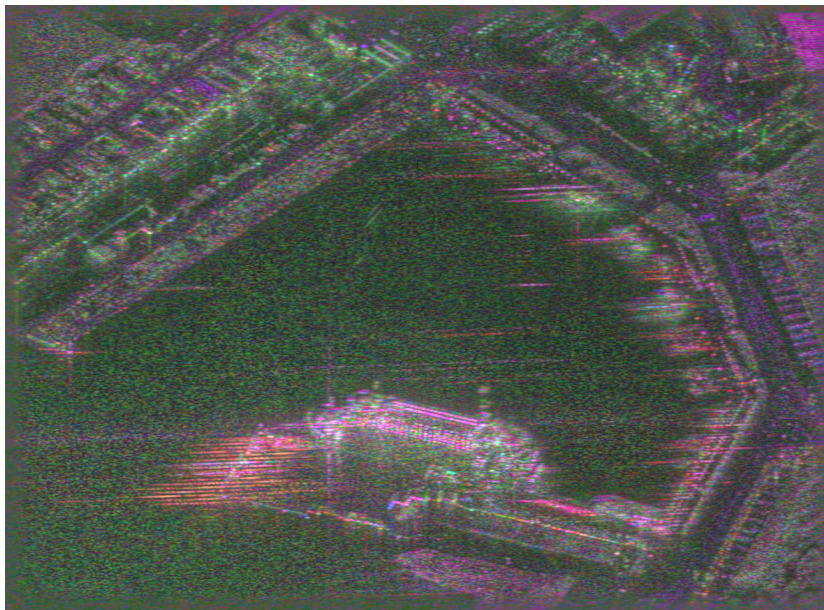


Abbildung 16: Das Radarbild eines Kreuzfahrtschiffes in Helgoland mit dem Fattal-Verfahren berechnet.

4 Bestimmung optimaler Parameter zu den einzelnen HDR-Algorithmen

Um die zuvor vorgestellten Algorithmen zur Verringerung des dynamischen Umfangs vergleichend Betrachten zu können, müssen diese mit den jeweils passenden Parametern für ein - subjektiv gesehen - optimales Endbild ausgeführt werden.

4.1 Einfache Parameteränderung durch angepasste Werkzeuge

Um diese Parameter zu ermitteln bieten sich Programme an, die die Möglichkeit bieten Parameter über Bedienelemente zu verändern und dabei das Ergebnis nahezu in Echtzeit zu betrachten.

Aufgrund der schon vorhandenen Fülle an Bildanzeigen in Python bot sich die Entwicklung von Widgets für PyQt an. Diese Widgets sind graphische Elemente und erfüllen die Aufgabe, eingegebene Bilder, bedingt durch die aktuelle Einstellung der jeweiligen Regler, über Hydra zu Verarbeiten und zurückzugeben.

Das Paket *hydra.dlr.toolbox* stellt sieben Berechnungs-, ein Skalierungs- und das Grundwid- get, das die Grundlage für alle anderen Widgets bildet (Abbildung 17).

```
1 # Imports
2 from hydra.dlr import toolbox as tb
3 from PyQt5 import QtWidgets
4 from matplotlib.pyplot as plt
5
6 # Image
7 img = xyz
8
9 # Create Window
10 app = QtWidgets.QApplication(sys.argv)
11 window = QtWidgets.QMainWindow()
12
13 # Layout
14 cent_fr = QtWidgets.QFrame()
15 window.setCentralWidget(cent_fr)
```

```
16 layout = QtWidgets.QHBoxLayout()
17 cent_fr.setLayout(layout)
18
19 widget_std = tb.StandardModule()
20 layout.addWidget(widget_std)
21 widget_std.changed_.connect(lambda: calc())
22
23 # Show window
24 window.show()
```

Quellcode 1: Beispielkommando zum Erzeugen eines Fensters mit dem Widget für den Standardalgorithmus

Quellcode 1 zeigt die Code-Sequenz für das Erstellen einer Benutzeroberfläche (ähnlich wie in Abbildung 18). Dafür werden zuerst die Pakete *hydra.dlr.toolbox*, *PyQt5.QtWidgets* und *matplotlib.pyplot* importiert. Daraufhin erfolgt das Erstellen eines neuen Fensters (Zeilen 10 & 11), dem auch ein Layout zugeordnet wird (Zeilen 14 bis 17). Abschließend wird ein Widget für die Bearbeitung von HDR-Bildern erzeugt und eingebunden (Zeilen 19 bis 21), wobei das *changed_*-Signal des Widgets mit einer in Quellcode 2 definierten Funktion *calc()* verbunden wird.

```
1 # Calc-function
2 def calc():
3     img_calc = widget_std.calc(img)
4
5     # Image display
6     fig, ax = plt.subplots()
7     ax.axis('off')
8     ax.set_title(img_calc[1])
9     ax.imshow(img_calc[0], interpolation='nearest')
10    plt.show()
```

Quellcode 2: Beispielpassage zum Erstellen und zur Anzeige eines Bildes

In dieser Funktion wird zuerst das Widget aufgefordert das Bild (*img*) in ein LDR-Bild umzuwandeln (Zeile 2). Daraufhin wird ein Tupel aus dem eigentlichen Bild und einem Bildstring zurückgegeben. In den Zeilen 5 bis 9 wird die graphische Ausgabe (siehe Abbildung 19) des Bildes mittels *pyplot* erzeugt.

4 Bestimmung optimaler Parameter zu den einzelnen HDR-Algorithmen

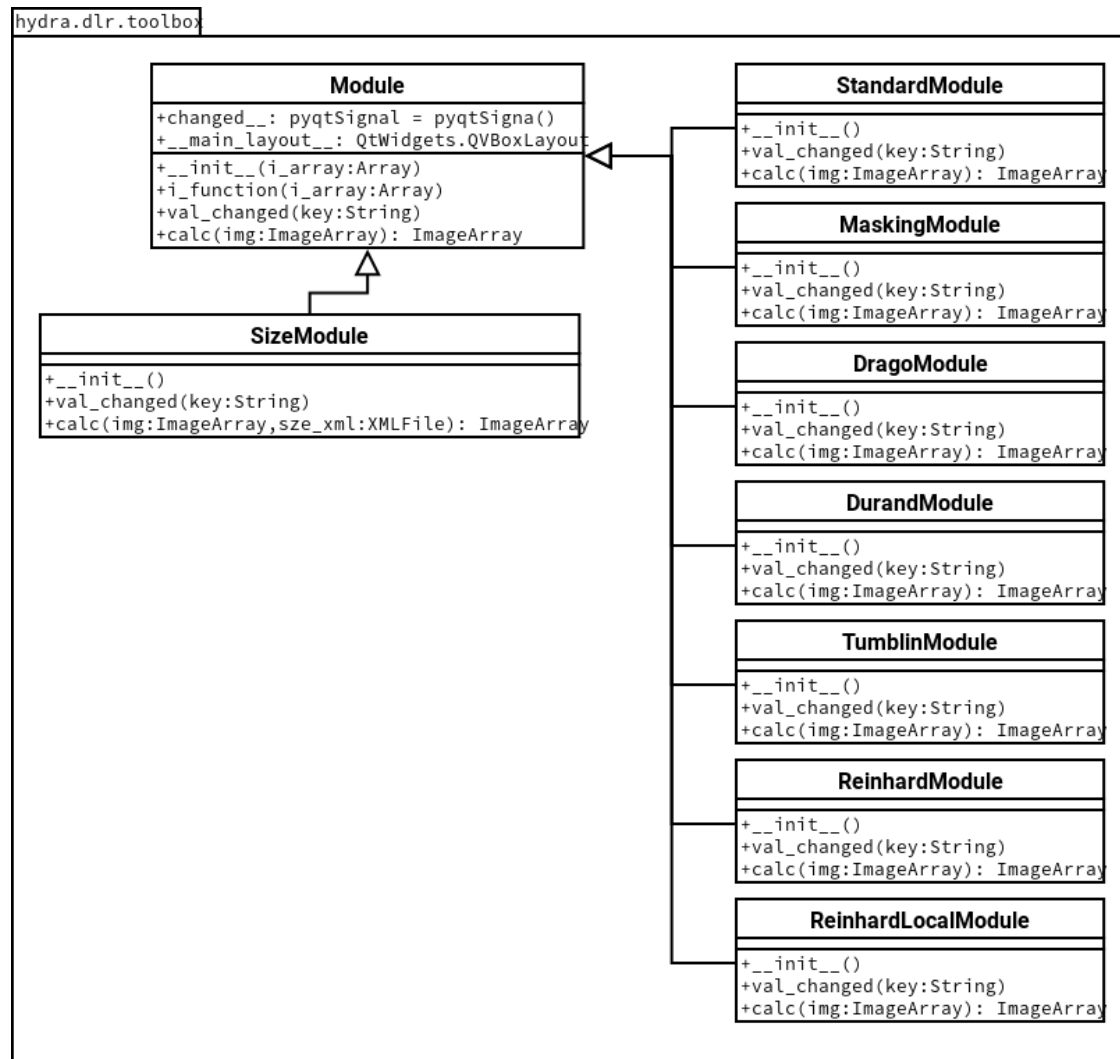


Abbildung 17: Klassendiagramm zum Paket "toolbox"

Generell gesehen läuft eine Veränderung der Schieberegler immer nach dem in Abbildung 20 gezeigten Schema ab.

4 Bestimmung optimaler Parameter zu den einzelnen HDR-Algorithmen

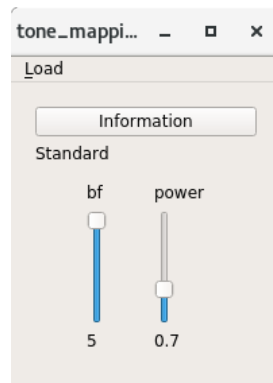


Abbildung 18: Fenster mit Widgets zum Festlegen der Parameter für den Standardalgorithmus und die Skalierung des Bildes

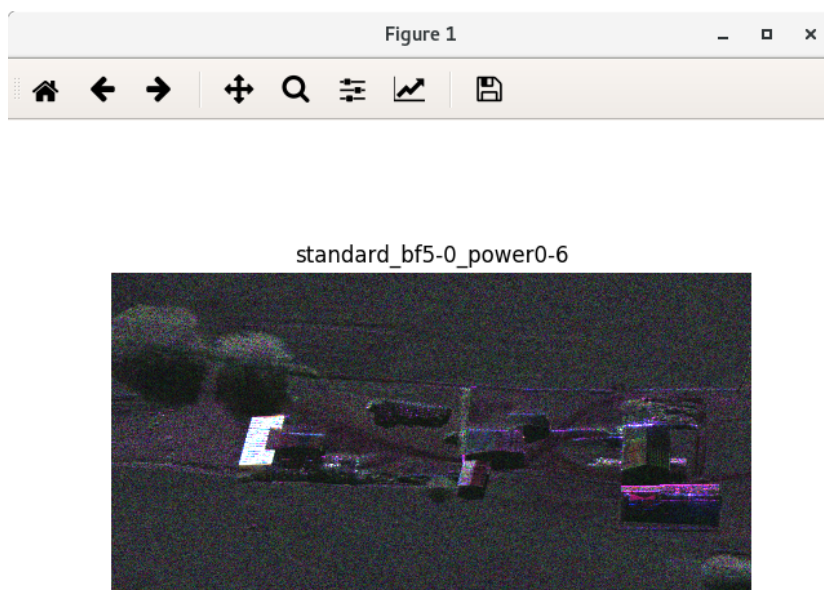


Abbildung 19: Darstellung eines zurückgegebenen Bildes mit matplotlib.pyplot

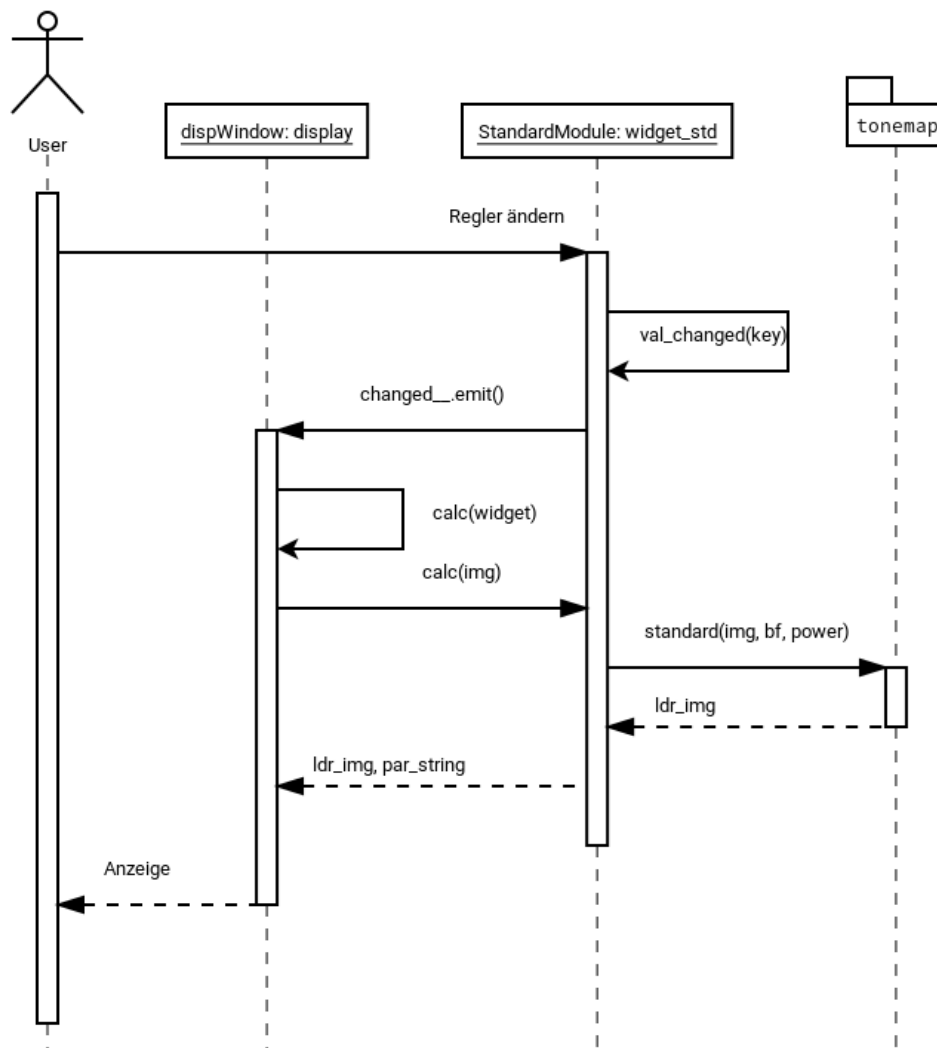


Abbildung 20: Sequenzdiagramm zum Verschieben eines Reglers

4.2 Bestimmung von optimalen Parametern für ausgewählte Algorithmen

Im Folgenden werden bestimmte Algorithmen auf die subjektiv gesehen optimalen Parameter untersucht. Dabei werden der Standard-, der Masken-, der Fattal- und der Lischinski-Algorithmus nicht behandelt, da für die zwei zuerst schon genannten Methoden schon Werte vorliegen und die zuletzt genannten sehr zeitintensiv bei Radarbildern sind.

Die Parameterbestimmung erfolgt durch visuelle Vergleiche von über verschiedene Parameter erzeugte Bilder, wobei im Folgenden lediglich beschrieben wird, was die Unterschiede sind. Die Vergleiche erfolgen auf einem U2410-Bildschirm von Dell und der Fokus liegt auf der Sichtbarkeit von Details, unter anderem auf den (zumeist) weiß erscheinenden Dach in der linken Bildhälfte.

4.2.1 Drago

Bei diesem Algorithmus wird nur der Parameter p untersucht, da $ldmax$ die generelle Helligkeit festlegt.

Hierbei werden die Werte $p = 1,0$, $p = 0,1$ und $p = 0,32$ untersucht. Bei diesen Werten fällt auf, dass kleinere Werte ein dunkleres Bild und leicht höhere Kontraste erzeugen. Hierbei ist durch Versuchen ein optimaler Wert von $p = 0,32$ ermittelt worden.

4.2.2 Durand

Der einzige Wert, der in der Implementierung des Durandalgorithmus durch Tatsuya Yatagawa[6] variabel ist ist der Wert für den Kontrast. Hierbei wurde durch Vergleichen festgestellt, dass aus vier Werten (50,0, 25,0, 9,5 und 2,0) der Wert 9,5 das visuell beste Ergebnis liefert.

4.2.3 Tumblin

Da die Parameter $ldmax$ und $cmax$ bei Jack Tumblin und Holly Rushmeier lediglich die Helligkeitsskalierung übernehmen, wird hier nur lda getestet, wobei die anderen Parameter jeweils den Wert 100,0 annehmen. Dabei werden die Werte 0,1, 11,0, 50,1, 100,0 und 150,0 verwendet.

Werte über dem Wert $lda = 50,0$ sollten nicht verwendet werden, da in den drei Bildern, deren Lda -Wert größer als 50 ist, das sichtbar zu machende Detail (die Riffelung des Daches in der linken Bildhälfte) als nahezu plane weiße Fläche auftritt. Folglich ist ein visuell optimaler Wert für den Parameter Lda unterhalb dieser Grenze zu suchen. Dabei fällt aber auf, dass 0,1 für den menschlichen Betrachter zu dunkel Ergebnisse liefert, beziehungsweise der dynamische Umfang dieser gering ist. Eine gute Reduzierung des dynamischen Umfangs bietet in diesem Fall die Verwendung des Wertes 11.0 für den Parameter Lda , da hier Details auf dem vorher erwähnten Dach sichtbar sind und die zur Verfügung stehende dynamische Umfang ausgeschöpft wird.

4.2.4 Reinhard

Bei diesem Algorithmus kann durch den Anwender nur der Parameter key , beziehungsweise $alpha$ bestimmt werden. Hierbei wurden als Vergleichswerte 0,01, 0,037 und 0,1 gewählt. Der Parameterwert 0,1 führt noch zu ausgedehnten weißen Flächen im Bild, wohingegen der Wert 0,01 generell wenig Kontrast erzeugt. Der Wert 0,037 wurde schlussendlich gewählt, da er ein Details sichtbar macht, gleichzeitig aber einen großen Kontrast gewährt.

4.2.5 Reinhard Local

Da bei diesem Algorithmus zwei Parameter (eps und key) verwendet werden konnten hier keine eindeutig optimalen Werte ermittelt werden. Im ersten Schritt werden beide Parameter zusammen auf den selben Wert (0,01, 0,25, 0,5 und 1,0) gesetzt und die Ergebnisse verglichen. Dabei fällt auf, dass Werte über 0,25 dafür sorgen, dass das Ergebnis eine hohe generelle Helligkeit aufweist und sich um Gebiete, die im oberen Spektrum des dynamischen Umfangs sind, ein "Heiligenschein" entwickelt.

Da das Parameterpaar 0,01 und 0,01 von den bisher betrachteten Bildern die größte Sichtbarkeit aufweist, werden jetzt nur leicht verschiedene Werten für die Parameter verwendet (0,04 für eps und 0,37 für key). Das Ergebnis wird mit dem vorher ermittelten Wertepaar verglichen.

Aufgrund der vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten von Radarbildern lässt sich hier aber kein eindeutiges Urteil fällen, da beide Wertkombinationen sehr gut lesbare und interpretierbare Daten für verschiedene Zwecke erzeugen.

5 Schlussfolgerung

Aufgrund ihrer unterschiedlichen Herangehensweise an die Konvertierung von HDR- zu LDR-Bildern lassen sich die zuvor vorgestellten Algorithmen zwar hinsichtlich der Ergebnisse vergleichen, aber nur oberflächlich.

Jede Methode hat dabei ihre Eigenheiten und kann bestimmte Details besser anzeigen als andere. Dabei darf aber nicht vergessen werden, dass die hier vorliegenden Algorithmen auf die Bearbeitung von optischen Daten, die sich sehr von Radardaten unterscheiden, optimiert sind. Dennoch hat sich aber herauskristallisiert, dass sich die Drago-Methode sehr gut zur Anwendung im Radarbereich eignet. Sie ist schnell, global und sie zeigt gute Visualisierungsergebnisse.

Es wird jedoch die Aufgabe zukünftiger Studien sein, diesen Bereich der Radardatenvisualisierung voranzutreiben.

Literaturverzeichnis

- [1] DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT E.V.: *Das DLR im Überblick*. Version: 2018. http://www.dlr.de/dlr/de/desktopdefault.aspx/tabid-10443/637_read-251/#/gallery/8570. – zuletzt aufgerufen: 15.03.2018
- [2] DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT E.V.: *Der Standort Oberpfaffenhofen des DLR*. Version: 2018. http://www.dlr.de/dlr/de/desktopdefault.aspx/tabid-10261/320_read-214#/gallery/701. – zuletzt aufgerufen: 15.03.2018
- [3] DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT E.V.: *Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme*. Version: 2018. http://www.dlr.de/hr/desktopdefault.aspx/tabid-2304/3442_read-39287/. – zuletzt aufgerufen: 15.03.2018
- [4] DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT E.V.: *Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme - Organisation*. Version: 2018. http://www.dlr.de/hr/desktopdefault.aspx/tabid-2312/3439_read-39331. – zuletzt aufgerufen: 15.03.2018
- [5] DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT E.V.: *Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme - Abteilung SAR Technologie (Prof. Dr. Andreas Reigber)*. Version: 2018. http://www.dlr.de/hr/desktopdefault.aspx/tabid-2326/3776_read-44251. – zuletzt aufgerufen: 15.03.2018
- [6] TATSUYA YATAGAWA: *Hydra*. Version: 2016. <https://github.com/tatsy/hydra>. – zuletzt aufgerufen: 16.01.2016
- [7] DRAGO, Frédéric ; MYSZKOWSKI, Karol ; ANNEN, Thomas ; CHIBA, Norishige: Adaptive logarithmic mapping for displaying high contrast scenes. In: *Computer Graphics Forum* Bd. 22 Wiley Online Library, 2003, S. 419–426
- [8] DURAND, Frédo ; DORSEY, Julie: Fast bilateral filtering for the display of high-dynamic-range images. In: *ACM transactions on graphics (TOG)* Bd. 21 ACM, 2002, S. 257–266
- [9] TUMBLIN, Jack ; RUSHMEIER, Holly: Tone reproduction for realistic images. In: *IEEE Computer graphics and Applications* 13 (1993), Nr. 6, S. 42–48
- [10] REINHARD, Erik ; STARK, Michael ; SHIRLEY, Peter ; FERWERDA, James: Photographic tone reproduction for digital images. In: *ACM transactions on graphics (TOG)* 21 (2002), Nr. 3, S. 267–276

- [11] WIKIPEDIA: *Ansel Adams in Wikipedia*. Version: 2018. https://de.wikipedia.org/wiki/Ansel_Adams. – zuletzt aufgerufen: 15.03.2018
- [12] FATTAL, Raanan ; LISCHINSKI, Dani ; WERMAN, Michael: Gradient domain high dynamic range compression. In: *ACM transactions on graphics (TOG)* Bd. 21 ACM, 2002, S. 249–256