

# **Bachelorarbeit**

**Kolorierung von Schwarz-Weiß-Aufnahmen**

zur Erlangung des akademischen Grades

Bachelor of Science

vorgelegt dem

Fachbereich Mathematik, Naturwissenschaften und Informatik  
der Technischen Hochschule Mittelhessen

**Maximilian Müller**

im Juli 2018

Referent: Prof. Dr. -Ing Aris Christidis

Korreferent: Prof. Dr. Bettina Just

# **Inhaltsverzeichnis**

<b>1 Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>2 Grundlagen zur Schwarz-Weiß-Fotografie</b>	<b>3</b>
<b>3 Umwandeln von Farbfotos in Schwarz-Weiß-Bilder</b>	<b>3</b>
<b>4 Das Programm zur Kolorierung von Schwarz-Weiß-Aufnahmen</b>	<b>4</b>
4.1 Verwendung von Lookup-Tables . . . . .	4
4.2 Beispiel einer Einfärbung mittels Lookup-Table . . . . .	5
4.3 Manipulation der Lookup-Table . . . . .	7
4.4 Teilbereiche eines Bildes einfärben . . . . .	9
4.5 Untersuchung der Einfärbungen . . . . .	12
<b>5 Kolorierung historischer Aufnahmen</b>	<b>17</b>
<b>6 Kombination mit Kantenerkennung</b>	<b>24</b>
<b>7 Berechnung der Lookup-Table</b>	<b>29</b>
7.1 lineare Berechnung . . . . .	29
7.2 Untersuchung von Lookup-Tables . . . . .	32
7.3 lineare Berechnung von Ausschnitten der Lookup-Tables . . . . .	35
<b>8 Helligkeits- und Farbverläufe in Bildern</b>	<b>38</b>
8.1 Funktionen der Lichtverläufe . . . . .	38
8.2 Berechnung von Looup-Tables mittels errechneten Lichtverläufen . . . . .	41
<b>9 Zusammenfassung</b>	<b>45</b>
<b>10 Funktionen der Programme</b>	<b>XLVI</b>
10.1 Programm 'automatische LT-Verschiebung' . . . . .	XLVI
10.2 Programm 'Objekt extrahieren' . . . . .	XLVII
10.3 Programm 'Lichtverlauf rekonstruieren' . . . . .	XLVII
<b>11 Literaturverzeichnis</b>	<b>XLVIII</b>

# 1 Einleitung

In dieser Arbeit geht es um die Frage, ob es möglich ist, Schwarz-Weiß-Aufnahmen nachträglich zu kolorieren.

Zu diesem Zweck sollen zunächst die Schwierigkeiten erläutert werden, die die Zuordnung von Farben zu Grauwerten mit sich bringt.

Danach wird anhand einiger Beispiele das Programm vorgestellt, das im Zuge dieser Arbeit entstanden ist. Es handelt sich hierbei um ein bereits bestehendes Programm, das bereits Bilder laden, speichern und bearbeiten kann. Es wurde im Zuge der Praktikums- und Thesisphase dahingehend erweitert, dass damit Schwarz-Weiß-Bilder eingefärbt werden können.

Danach wird es noch um einige Ansätze gehen, mit denen ein besseres Einfärben gelingen soll, wie zum Beispiel die Verwendung einer Kantenerkennung.

## 2 Grundlagen zur Schwarz-Weiß-Fotografie

Bei der herkömmlichen Schwarz-Weiß-Fotografie wird in einer Kamera mittels Linsen eine lichtempfindliche Schicht belichtet, die auf einem transparenten Material, zum Beispiel einem Polyesterfilm, aufgetragen ist.

Nach dem Entwickeln sind die verschiedenen Lichtintensitäten auf dem Film in Form von mehr oder weniger hellen Stellen zu sehen.<sup>1</sup> Aus diesem Wechsel von hellen und dunklen Arealen ergibt sich dann schließlich das fotografierte Motiv.

Für das nähere Verständnis der Schwierigkeiten bei der Kolorierung von Schwarz-Weiß-Aufnahmen ist es also wichtig zu wissen, dass ein Schwarz-Weiß-Foto lediglich Helligkeitswerte in Form von Graustufen darstellt.

Doch bereits mit Aufkommen der Schwarz-Weiß-Fotografie war es der Wunsch vieler Menschen ihre Fotos auch in Farbe betrachten zu können.

So ist es nicht verwunderlich, dass man bereits um 1900 damit begonnen hat, Schwarz-Weiß-Fotos von Hand einzufärben.<sup>2</sup> Dieser Vorgang war meist mit einem großen Aufwand, viel Zeit und Geduld verbunden.

Auch in der heutigen Zeit ist der Wunsch nach eingefärbten, historischen Schwarz-Weiß-Aufnahmen ungebrochen. Doch bislang ist es noch nicht gelungen, eine Software zu entwickeln, die Schwarz-Weiß-Aufnahmen zuverlässig automatisch einfärben kann.<sup>3</sup> Die Frage an dieser Stelle lautet also nun: ist es möglich den Prozess des Einfärbens von Schwarz-Weiß-Bildern mittels eines Programms ganz oder zumindest teilweise zu automatisieren.

## 3 Umwandeln von Farbfotos in Schwarz-Weiß-Bilder

Keinerlei Probleme stellt derzeit das Umwandeln eines Farbfotos in ein Schwarz-Weiß-Bild da. Die meisten modernen Bildbearbeitungsprogramme und sogar Smartphones und Digitalkameras besitzen eine Funktion, um aus farbigen Bildern Schwarz-Weiß-Bilder zu machen. Hierzu bedient man sich einer Formel, die an die alten Schwarz-Weiß-Filme und die menschliche Wahrnehmung angepasst ist.<sup>4</sup>

$$\text{Grauwert} = 0.299 * \text{Rotwert} + 0.587 * \text{Grünwert} + 0.114 * \text{Blauwert}$$

<sup>1</sup>Schwarzweißfotografie, Wikipedia, <https://de.wikipedia.org/wiki/Schwarzweißfotografie>, letzter Zugriff: 04.01.2018

<sup>2</sup>Solveig Grothe, Plötzlich ist die Welt ein bisschen bunter, <http://www.speigel.de/einestages/nachkolorierte-schwarzweiss-fotos-eine-neue-dimension-a-1098796.html>, letzter Zugriff: 04.01.2018

<sup>3</sup>Solveig Grothe, Plötzlich ist die Welt ein bisschen bunter, <http://www.speigel.de/einestages/nachkolorierte-schwarzweiss-fotos-eine-neue-dimension-a-1098796.html>, letzter Zugriff: 04.01.2018

<sup>4</sup>Prof. Dr. Aris Christidis, Bildauswertung und -bearbeitung, WS 2017 / 18, letzter Zugriff: 04.01.2018

Jedes Pixel setzt sich aus drei Farbwerten, den Grundfarben, Rot, Grün und Blau zusammen. Durch dieses Zusammensetzen aus einem Rot-, einem Grün- und einem Blauwert, ergeben sich die einzelnen Farben für jedes Pixel. Jeder dieser drei Farbkomponenten eines Pixels kann einen Wert zwischen 0 und 255 annehmen.

Besitzt ein Pixel zum Beispiel einen Rotwert von 100, einen Blauwert von 80 und einen Grünwert von 160, so ergibt sich für dieses Pixel die Farbe violett.

Geht man also ein Farbfoto mit Hilfe eines Programms Pixel für Pixel durch und wendet auf jedes Pixel die eben erwähnte Formel an, wird dieses anhand seines Rot-, Grün- und Blauanteils in ein entsprechendes graues Pixel umgerechnet. Jedoch ist dieser Prozess nicht umkehrbar. Man kann also mittels dieser oder einer ähnlichen Formel keine Schwarz-Weiß-Fotos in Farbfotos umrechnen. Dies liegt daran, dass es mehr Farben als Graustufen gibt. Es werden also eine große Zahl Farben einer geringeren Zahl an Graustufen zugewiesen. Mit einem Programm kann errechnet werden, dass es Graustufen gibt, die bis zu 110.000 unterschiedliche Kombinationen aus Rot-, Grün- und Blauwerten darstellen können. Daher macht es auch keinen Sinn, mittels Tabellen Eingrenzungen vorzunehmen, welche unterschiedlichen Farben jeder Grauwert darstellen kann, um damit eine Einfärbung zu ermöglichen. Es sind schlicht zu viele Möglichkeiten um damit eine Kolorierung vornehmen zu können.

## 4 Das Programm zur Kolorierung von Schwarz-Weiß-Aufnahmen

### 4.1 Verwendung von Lookup-Tables

Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse, dass einzelne Graustufen eine Vielzahl an unterschiedlichen Farben darstellen können und Grauwerte nicht mittels einer Formel in einen Farbwert zurückgerechnet werden können, ist es erforderlich, die Farben, die eine Graustufe darstellen kann, einzuschränken.

Dies geschieht in diesem Fall unter Zuhilfenahme von Lookup-Tables.

In einer solchen Tabelle wird jedem einzelnen Grauwert genau ein Grün-, Rot- und Blauwert zugewiesen, woraus sich die Farben der einzelnen Pixel zusammensetzen.

Dadurch ergibt sich für jede Graustufe in der Lookup-Table exakt eine Farbe.

Eine solche Lookup-Table kann man sich wie in der folgenden Grafik vorstellen.

zugewiesener Blauwert	...	6	7	7 ...	122	125	250	255
zugewiesener Grünwert	...	11	13	13 ...	125	132	255	255
zugewiesener Rotwert	...	10	10	11 ...	210	230	254	255
Grauwert des zu färbenden Pixels	...	10	11	12 ...	150	160 ...	254	255

Abbildung 1: Ausschnitt einer fiktiven Lookup-Table

In dem Ausschnitt der fiktiven Lookup-Table in Abbildung 1 ist gut zu erkennen, wie jedem Grauwert ein Rot-, Grün- und Blauwert zugeordnet wird. Findet das Programm also zum Beispiel in einem Schwarz-Weiß-Bild ein Pixel mit dem Grauwert 150, so erhält dieses Pixel die neuen Werte für Rot = 210, Grün = 125 und Blau = 122 aus der Lookup-Table. Durch die Zusammensetzung jedes Pixels aus einem Rot-, Grün- und Blauanteil ergeben sich dann die unterschiedlichen Farben. In diesem Beispiel würde sich für das Pixel mit der Graustufe 150 die Farbe Hellblau ergeben. Jedoch gibt es bei der Nutzung von Lookup-Tables ein Problem. Denn ein und dieselbe Lookup-Table ist nicht auf jedes Bild anwendbar. Eine Lookup-Table, die zum Beispiel auf ein Schwarz-Weiß-Bild angewandt wird, das einen Garten zeigt, ist nicht auf ein Bild anwendbar, das zum Beispiel ein Ozean

zeigt. Dies liegt daran, dass in beiden Bildern sehr unterschiedliche Farben vorkommen und die Lookup-Table nur eine begrenzte Anzahl an Farbkombinationen aus Rot-, Grün- und Blauwerten speichern kann. Aus diesem Grund ist es notwendig, dass die Lookup-Table universell angepasst werden kann. Dies geschieht indem Referenzbilder verwendet werden. In diesem Fall wird ein Farbfoto verwendet, bei dem man sicher ist oder zumindest davon ausgeht, dass die gleichen Farben darin vorkommen, wie auch in dem einzufärbenden Schwarz-Weiß-Bild. Mit den Rot-, Grün- und Blauwerten dieses Farbfotos wird dann die Lookup-Table befüllt, mit der das Schwarz-Weiß-Bild schließlich eingefärbt wird. Um diese Technik besser zu verdeutlichen, soll an dieser Stelle eine relativ simple Einfärbung geschildert werden. Bei diesem Beispiel sollen auch die verschiedenen Funktionen des Programms erklärt werden, die für eine Kolorierung benötigt werden.

## 4.2 Beispiel einer Einfärbung mittels Lookup-Table

In dem nun folgenden Beispiel wird ein Schwarz-Weiß-Foto von einer Messing-Patronenhülse mittels Referenzbild eingefärbt. Diese Patrone befindet sich nicht in meinem Besitz und konnte somit von mir nicht unmittelbar in Augenschein genommen werden, um die darin vorkommenden Farben zu analysieren.



Abbildung 2: einzufärbendes Schwarz-Weiß-Bild einer Patronenhülse

In Abbildung 2 ist das Schwarz-Weiß-Foto zu sehen, welches es einzufärben gilt. Für eine korrekte Einfärbung muss zunächst eine Vermutung angestellt werden, welche Farben auf diesem Foto vorkommen könnten. Dies muss geschehen, um ein geeignetes Referenzbild auszuwählen, mit dem die Lookup-Table befüllt wird. Zu diesem Zweck wird hier das Bild einer Granathülse verwendet, um damit die Patrone einzufärben.



Abbildung 3: Referenzbild zum Befüllen der Lookup-Table

In Abbildung 3 ist das Referenzbild zur Einfärbung der Patrone zu sehen. Es handelt sich hierbei um eine Messinghülse, die aus dem gleichen Material, wie auch die Patronenhülsen gefertigt ist. Aus diesem Grund ist davon auszugehen, dass auf diesem Bild die gleichen oder zumindest ähnlichen Farben vorkommen, wie auch auf dem einzufärbenden Schwarz-Weiß-Bild.

Das Programm geht nun das Referenzbild durch und errechnet für jedes einzelne Pixel den Grauwert, den es nach der bereits erwähnten Formel aus Kapitel 3 annehmen würde. Nun werden die drei Farbkomponenten dieses Pixels an den des Grauwerts entsprechenden Stellen in drei Textdateien abgespeichert. Diese Textdateien bilden die die Lookup-Table. Wird zum Beispiel für ein Pixel anhand seines Rot-, Grün- und Blauwerts der Grauwert 152 errechnet, so wird dessen Rotwert in der Datei für die Rotwerte an Stelle 152, dessen Blauwert in der Datei für Blauwerte an Stelle 152 und der Grünwert in der Datei für Grünwerte an Stelle 152 gespeichert. Auf diese Weise entsteht eine Lookup-Table wie man sie sich in Abbildung 1 vorstellen kann. Wird also nun die Lookup-Table mit den Werten aus diesem Bild befüllt, kann damit das Schwarz-Weiß-Bild der Patrone eingefärbt werden. Zu diesem Zweck geht das Programm nun das Schwarz-Weiß-Bild aus Abbildung 2 durch und fügt für jedes graue Pixel die Rot-, Grün- und Blauwerte aus den drei Textdateien für die Rot-, Grün- und Blauwerte ein. Findet das Programm zum Beispiel ein graues Pixel mit dem Wert 152, so fügt es für dieses Pixel den Rotwert aus der Textdatei für die Rotwerte an der Stelle 152, den Grünwert aus der Textdatei für Grünwerte an der Stelle 152 und den Blauwert aus der Textdatei für die Blauwerte an der Stelle 152 ein. Dadurch ergibt sich für dieses Pixel die gleiche Farbe wie auf dem Referenzbild.



(a) eingefärbte Patrone



(b) Originalbild der Patrone

Abbildung 4: Vergleich zwischen Einfärbung und Originalbild

In Abbildung 4 ist die eingefärbte Patrone neben dem Originalbild zu sehen. Dabei fällt auf, dass es dem Originalbild rein optisch schon sehr nahe kommt, im Vergleich dazu aber wesentlich heller ist. Für einen solchen Fall ist es erforderlich, dass die Lookup-Table manipuliert werden kann.

### 4.3 Manipulation der Lookup-Table

Bei vielen Einfärbungen besteht das Problem, dass sich die Helligkeiten des Referenzbildes und des einzufärbenden Schwarz-Weiß-Bildes unterscheiden. Dies kann daran liegen, dass zum Beispiel Referenz- oder Schwarz-Weiß-Bild über beziehungsweise unterbelichtet sind. In einem solchen Fall muss die Lookup-Table angepasst werden, um zum Beispiel mit einem dunklen Referenzbild ein helles Schwarz-Weiß-Bild kolorieren zu können. Zu diesem Zweck vergleicht das Programm die durchschnittliche Helligkeit aus dem Referenzbild mit der durchschnittlichen Helligkeit in dem einzufärbenden Schwarz-Weiß-Bild. Die Lookup-Table wird dann um die Differenz dieser beiden Durchschnittswerte verschoben. Dieses Vorgehen soll an dieser Stelle anhand eines Beispiels verdeutlicht werden.

Sobald mittels Tastendruck die Lookup-Table mit den Werten aus dem Referenzbild befüllt wird, errechnet das Programm auch gleichzeitig die durchschnittliche Helligkeit in diesem Bild. Zu diesem Zweck wird für jedes Pixel dessen Helligkeit berechnet, die Helligkeitswerte aller in dem Bild vorkommenden Pixel zusammengezählt und durch die Anzahl der im Bild vorkommenden Pixel dividiert.

Nun wechselt man in das einzufärbende Bild und errechnet mittels Tastendruck hier auf die gleiche Art den durchschnittlichen Helligkeitswert des Bildes. Nun wird die Differenz des errechneten Wertes aus dem Referenzbild und des errechneten Wertes aus dem einzufärbenden Bild gebildet. Dieser Wert, der sich durch die Subtraktion ergibt, stellt die notwendige Verschiebung der Lookup-Table dar. Die Formel zur Berechnung der notwendigen Verschiebung lautet wie folgt:

$$S_1 = \text{Summe der Helligkeitswerte aller Pixel aus dem Referenzbild}$$

$$S_2 = \text{Summe der Helligkeitswerte aller Pixel aus dem einzufärbenden Schwarz-Weiß-Bild}$$

$$M_1 = \text{Anzahl der Pixel in dem Referenzbild}$$

$$M_2 = \text{Anzahl der Pixel in dem einzufärbenden Schwarz-Weiß-Bild}$$

$$\text{Verschiebung} = \frac{S_1}{M_1} - \frac{S_2}{M_2}$$

Wie man sich eine solche Verschiebung innerhalb der Lookup-Table vorstellen kann, ist in den Abbildungen 5 und 6 zu sehen.

zugewiesener Blauwert		6	7	7 ...	122	125 ...	250	255 ...
zugewiesener Grünwert		11	13	13 ...	125	132 ...	255	255 ...
zugewiesener Rotwert		10	10	11 ...	210	230 ...	254	255 ...
Grauwert des zu färbenden Pixels	...	10	11	12 ...	150	160 ...	254	255

Abbildung 5: fiktive, nach links verschobene Lookup-Table

In der Abbildung 5 ist die fiktive Lookup-Table aus Abbildung 1 zu sehen die um eine Stelle nach links verschoben ist. Gut zu erkennen ist hier, wie den unveränderten Grauwerten neue Rot-, Grün- und Blauwerte zugewiesen werden. Durch diese Manipulation können Helligkeitswerte angepasst und somit auch relativ dunkle Schwarz-Weiß-Bilder mit Referenzbildern eingefärbt werden, die im Vergleich dazu sehr hell sind. Natürlich besteht auch die Möglichkeit, eine Verschiebung nach rechts vorzunehmen, wie auf der folgenden Grafik zu sehen ist.

zugewiesener Blauwert	...	...	6	7	7 ...	122	125 ...	250
zugewiesener Grünwert	...	...	11	13	13 ...	125	132 ...	255
zugewiesener Rotwert	...	...	10	10	11 ...	210	230 ...	254
Grauwert des zu färbenden Pixels	...	10	11	12 ...	150	160 ...	254	255

Abbildung 6: fiktive, nach rechts verschobene Lookup-Table

In Abbildung 6 ist die gleiche fiktive Lookup-Table zusehen, die nun nach rechts verschoben ist. Dadurch ist es möglich relativ helle Schwarz-Weiß-Bilder mit vergleichsweise dunklen Referenzbildern einzufärben. Die Werte, um die die Lookup-Table verschoben wird ergeben sich, wie bereits geschildert, aus dem Helligkeitsunterschied zwischen Referenzbild und Schwarz-Weiß-Bild. Bei der Lookup-Table in Abbildung 5 wäre zum Beispiel der Durchschnittswert der Helligkeit in dem Referenzbild um den Wert eins niedriger, als der des einzufärbenden Schwarz-Weiß-Bildes. Hingegen wäre in dem Fall der Lookup-Table aus Abbildung 6 das Referenzbild im Durchschnitt um den Wert eins heller, als das Schwarz-Weiß-Bild.



(a) mitels manipulierter Lookup-Table eingefärbte Patrone



(b) mitels unveränderter Lookup-Table eingefärbte Patrone

Abbildung 7: Vergleich zwischen Einfärbungen mit und ohne manipulierter Lookup-Table

In Abbildung 7a ist die Einfärbung der Patrone, die mit Hilfe einer manipulierten Lookup-Table vorgenommen wurde, zu sehen. In diesem Fall wurde die Lookup-Table um 42 Stellen nach rechts verschoben. Vergleicht man diese Kolorierung in Abbildung 8a mit der Einfärbung aus Abbildung 8b, so fällt auf, dass durch die Manipulation der Lookup-Table eine Abdunklung erreicht wurde. Dies bedeutet, dass das verwendete Referenzbild im Durchschnitt um 42 Graustufen heller ist, als das einzufärbende Schwarz-Weiß-Bild. Daher verschiebt das Programm die Lookup-Table um diese Differenz, um den Helligkeitsunterschied zu kompensieren.

Für eine weitere Verbesserung von Einfärbungen ist jedoch noch eine weitere Funktion von Nöten. Denn nicht nur die Helligkeit muss in den Bildern angepasst werden, sondern in vielen Fällen ist es notwendig, Teilbereiche von Bildern unabhängig voneinander kolorieren zu können.

#### 4.4 Teilbereiche eines Bildes einfärben

In vielen Bildern kommen sehr unterschiedliche Farben vor. Besonders zwischen Hintergrund und im Bild vorkommenden Objekten bestehen häufig erhebliche Farbunterschiede. Dadurch kann das Problem entstehen, dass eine einzelne Lookup-Table zur Darstellung des benötigten Farbraums nicht ausreicht. Auch das Problem der Überlagerung von Grauwerten spielt hier eine wichtige Rolle. Denn wie bereits geschildert kann ein Grauwert eine Vielzahl an unterschiedlichen Farben darstellen. In einer Lookup-Table kann aber jedem Grauwert nur exakt eine Farbkombination aus Rot-, Grün- und Blauwerten zugewiesen werden. In einem solchen Fall ist es erforderlich, auf Hintergrund und Objekte unterschiedliche Lookup-Tables an zu verwenden, um ein besseres Ergebnis bei der Einfärbung zu erzielen.

Auch bei der Einfärbung der Patrone ist es möglich, durch eine separate Einfärbung von Patrone und Hintergrund dem Originalbild näher zu kommen. Zu diesem Zweck besteht in dem Programm die Möglichkeit, dass man mit den Tasten 'w', 'a', 's' und 'd' einen in seiner Größe variablen Rahmen durch das Bild bewegen kann und somit das Schwarz-Weiß-Bild mit Hilfe der Lookup-Table nur innerhalb dieses Rahmens koloriert. Dadurch können Bereiche in Schwarz-Weiß-Bildern unabhängig voneinander eingefärbt werden.

Im Zusammenhang mit der Möglichkeit, nur Teilbereiche eines Bildes einfärben zu können ist es natürlich auch notwendig, die bereits erwähnte Verschiebung der Lookup-Table lediglich auf diesen Bereich innerhalb des Rahmens zu beschränken. Dadurch ist es mög-

lich, die Helligkeit des Referenzbildes nicht nur an das gesamte einzufärbenden Bild an zu gleichen, sondern auch lediglich nur an den einzufärbenden Bereich innerhalb des Rahmens. Dies ist aus dem Grund wichtig, da die Differenz zwischen den durchschnittlichen Helligkeitswerten in dem einzufärbenden Teilbereich und dem ersten Referenzbild eine andere sein kann, als die von den anderen Teilbereichen des Schwarz-Weiß-Bildes und einem weiteren Referenzbild. Auch ist es möglich, dass die Helligkeit eines Referenzbildes für ein Objekt innerhalb eines Schwarz-Weiß-Bildes ausreichend ist, aber zum Beispiel für den Hintergrund zu hell oder zu dunkel ist. Auch in einem solchen Fall muss die Lookup-Table-Verschiebung innerhalb eines Rahmens angewandt werden.

Die folgende Formel soll verdeutlichen, wie die Verschiebung der Lookup-Table aus den Durchschnittswerten des Referenzbildes und den durchschnittlichen Grauwerten innerhalb eines Rahmens berechnet wird:

$$S_1 = \text{Summe der Helligkeitswerte aller Pixel aus dem Referenzbild}$$

$R_{S2}$  = Summe der Helligkeitswerte aller Pixel aus dem einzufärbenden Schwarz-Weiß-Bild innerhalb des Rahmens

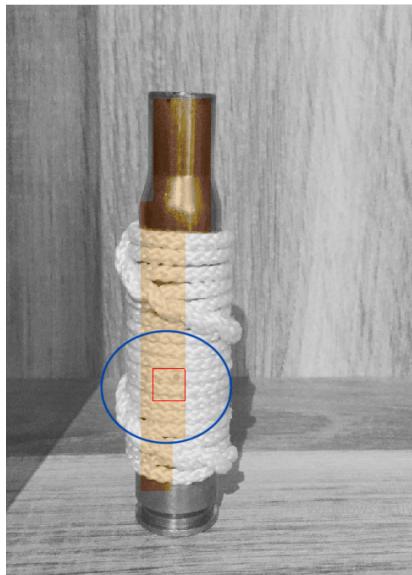
$M_1$  = Anzahl der Pixel in dem Referenzbild

$R_{M2}$  = Anzahl der Pixel in dem einzufärbenden Schwarz-Weiß-Bild innerhalb des Rahmens

$$\text{Verschiebung} = \frac{S_1}{M_1} - \frac{R_{S2}}{R_{M2}}$$

Eine solche Einfärbung von Teilbereichen eines Schwarz-Weiß-Bildes soll im folgenden Beispiel erneut anhand der Patrone verdeutlicht werden.

Zunächst wird die Lookup-Table mit dem Bild der Messinghülse aus Abbildung 3 gefüllt. Mit dieser Lookup-Table wird dann unter Zuhilfenahme des beweglichen Rahmens lediglich die Patrone auf dem Schwarz-Weiß-Bild eingefärbt.



(a) beweglicher Rahmen



(b) mittels Rahmen eingefärbte Patrone

Abbildung 8: unabhängig vom Hintergrund eingefärbte Patrone

Auf Abbildung 8a ist innerhalb der blauen Markierung der bewegliche Rahmen zu sehen, der durch das Bild bewegt werden kann und innerhalb dessen die Lookup-Table zum Kolorieren angewandt wird. Auch die Anpassung der Lookup-Table kann wie bereits erläutert auf diesen Bereich innerhalb des Rahmens angewandt werden.

Der Rahmen kann in seiner Größe mittels Tastendruck von sehr großen bis sehr kleinen Kantenlängen angepasst werden. Dadurch ist es möglich, mit dem Rahmen einen sehr

großen Bereich, aber auch einen äußerst kleinen Bereich des Bildes einzufärben. In diesem Beispiel ist eine vergleichsweise kleine Kantenlänge zu sehen, da die Patrone sehr schmal ist.

In Abbildung 8b ist das Ergebnis zu sehen, nachdem der Rahmen durch die Patrone bewegt und die Lookup-Table somit auf die Patrone angewandt wurde. Als nächstes muss das teilweise eingefärbte Schwarz-Weiß-Bild gespeichert und die Lookup-Table mit einem anderen Referenzbild befüllt werden, um auch den Hintergrund kolorieren zu können. In diesem Fall dient dazu das Bild eines Regals als Referenzbild.

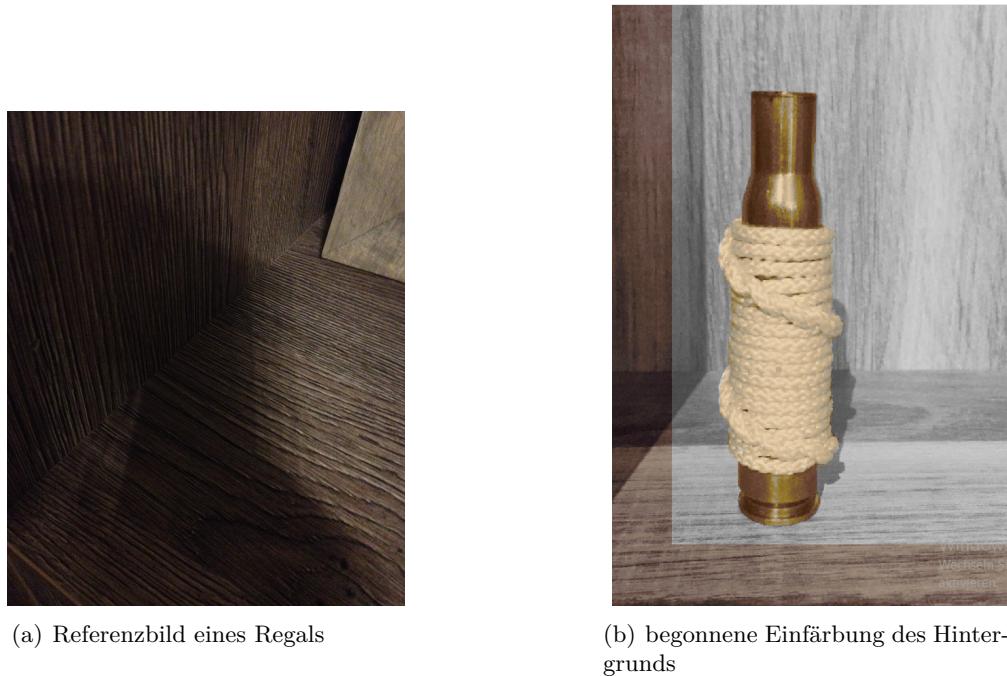


Abbildung 9: Kolorierung des Hintergrunds unabhängig von der Patrone

In Abbildung 9a ist das Bild eines Regals zu sehen, welches als Referenzbild für den Hintergrund dient. Die Lookup-Table wird also in diesem Fall mit den Werten dieses Bildes gefüllt und auf den Hintergrund des Schwarz-Weiß-Bildes der Patrone in Abbildung 9b angewandt. Die Einfärbung des Hintergrundes wird hier ebenfalls mit Hilfe des Rahmens vorgenommen, mit dem schon die Patrone eingefärbt wurde.

Besonders so große Flächen, wie dieser Hintergrund sind sehr schnell und unkompliziert zu kolorieren und nehmen nur sehr wenig Zeit in Anspruch. In Abbildung 9b ist die erste Phase der Einfärbung des Hintergrundes zu sehen. Dort sind der linke und der untere Rand bereits koloriert. Fährt man auf diese Art mit der Kolorierung fort, ergibt sich ein farbiges Bild wie in Abbildung 10a zu sehen ist.



(a) vollständig eingefärbtes Bild



(b) Originalbild

Abbildung 10: Vergleich Einfärbung und Originalbild

Vergleicht man die Einfärbung in Abbildung 10a mit dem Originalbild in Abbildung 10b rein optisch, so fällt auf, wie gut diese Einfärbung gelungen ist. Doch es stellt sich die Frage, ob solche Einfärbungen tatsächlich in ihren Farbverläufen dem Original gleichen, oder ob dieser Eindruck täuscht. Zu diesem Zweck sollen mit Hilfe des Programms die Farbverläufe in den beiden Bildern aus Abbildung 10 untersucht und miteinander verglichen werden. Nur so kann herausgefunden werden, wie gut die Einfärbung gelungen ist.

#### 4.5 Untersuchung der Einfärbungen



(a) untersuchte Einfärbung



(b) untersuchtes Originalbild

Abbildung 11: entlang der Roten Linien untersuchte Farbverläufe

In den Abbildungen 11a und 11b wurde entlang der rot eingezeichneten Linie die Rot-, Grün- und Blauwerte jedes einzelnen Pixel, das auf dieser Linie liegt, ausgelesen. Dazu geht das Programm das Bild entlang der roten Linie von unten nach oben durch

und ermittelt nacheinander für jedes Pixel dessen Rot-, Grün- und Blauwerte. Diese Rot-, Grün- und Blauwerte werden dann in je eine Textdatei für die drei Farbwerte gespeichert und dann in ein Diagramm übertragen. Auf diese Art können die Farbverläufe in den Bildern von unten nach oben exakt dargestellt werden, wodurch es möglich ist, nicht nur subjektive Einschätzungen über die Qualität der Einfärbung zu treffen, sondern die tatsächlichen Farbverläufe aus Originalbild und Einfärbung miteinander zu vergleichen.

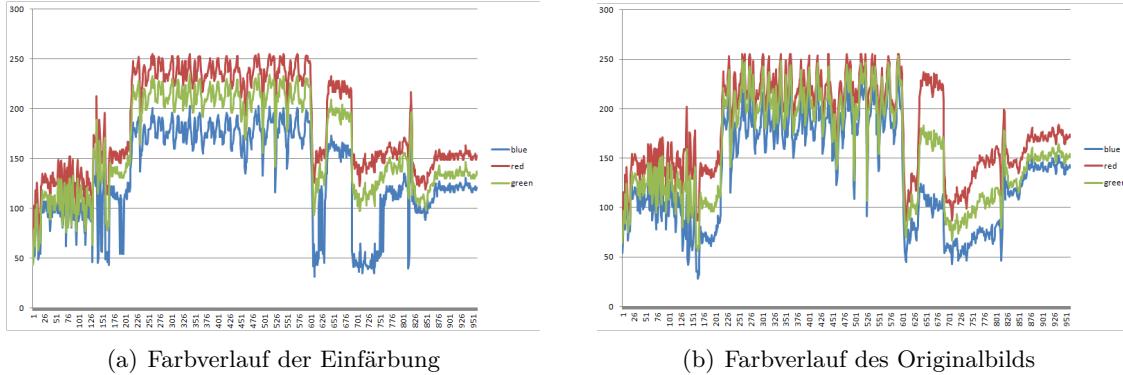


Abbildung 12: Diagramme der entlang der Roten Linien untersuchten Farbverläufe

In den Diagrammen 12a und 12b sind die Farbwerte der Pixel zu sehen, die auf den roten Linien aus den Abbildungen 11a und 11b liegen.

Auf der X-Achse sind die einzelnen Pixel abgebildet, die auf der roten Linie liegen und in Y-Richtung sind darüber die zu jedem Pixel gehörenden Werte der drei Farbkomponenten, Rot, Grün und Blau abzulesen. In den Punkten  $X = 0$  befindet sich in beiden Grafiken jeweils das Pixel, das am unteren Rand des Bildes auf der roten Linie liegt.

Deutlich zu erkennen ist, dass die Verläufe der Rot-, Grün- und Blauwerte der beiden untersuchten Bilder sich sehr ähneln. Zwar sind stellenweise kleine Unterschiede und Abweichungen zu erkennen, aber das Gros der Farbverläufe ist sehr ähnlich.

Besonders bemerkenswert ist dies unter Anbetracht der Tatsache, dass die Einfärbung nicht mit dem Originalbild selbst, sondern mit Referenzbildern geschehen ist.

Das die Kurven der Diagramme sich so stark ähneln spricht deutlich für das Funktionieren dieser Einfärbungsmethode.

Auch anhand der Untersuchung einer weiteren Einfärbung kann das Funktionieren des Programms verdeutlicht werden. Dazu dient die Einfärbung eines Schwarz-Weiß-Bildes des deutschen Segelschulschiffs Gorch Fock.



Abbildung 13: einzufärbendes Schwarz-Weiß-Bild der Gorch Fock

Das in Abbildung 13 zu sehende Bild der Goch Fock kann mit Hilfe mehrerer Referenzbilder eingefärbt werden. Auch hier dient der bereits beschriebene variable Rahmen zum Einfärben einzelner Teilbereiche des Bildes.

So wurden zum Beispiel Himmel und Wasser mit dem Referenzbild aus Abbildung 14b eingefärbt. Für die Einfärbung der Masten und einiger Decksaufbauten wurde das Bild aus Abbildung 14a verwendet, auf dem ebenfalls ein Mast zu sehen ist. Beiboot und Heckflagge wurden mittels des Referenzbildes der Deutschlandflagge aus Abbildung 14c koloriert. Auf eine Kolorierung des weißen Rumpfes wurde jedoch verzichtet, da sich dessen Farben in dem Farb- und Schwarz-Weiß-Bild praktisch nicht unterscheiden. Daher gewinnt man durch eine Einfärbung des Rumpfes keinerlei Verbesserung des Einfärbungsergebnisses.



(a) Referenzbild für die Einfärbung der Masten



(b) Referenzbild für Himmel und Wasser



(c) Referenzbild für Heckflagge und Beiboot

Abbildung 14: Referenzbilder zur Einfärbung der Gorch Fock

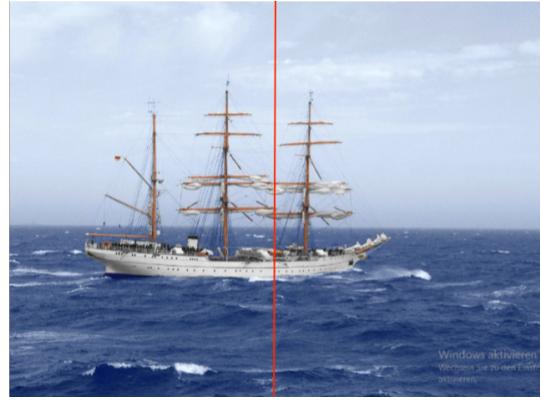
Auch im Fall der eingefärbten Gorch Fock gelang eine verblüffend gute Annäherung an das farbige Originalbild, wie in den Abbildungen 15a und 15b zu sehen ist.

In diesem Fall, wie schon vorher bei der Patrone, wurden lediglich Referenzbilder zur Kolorierung verwendet, von denen vermutet wurde, dass ähnliche Farben wie in dem Originalbild darin vorkommen. Es wurde komplett darauf verzichtet, Farben direkt aus dem Originalbild zu verwenden, um das Schwarz-Weiß-Bild einzufärben.

In der folgenden Abbildung 15 ist das eingefärbte Bild neben dem Originalbild als Vergleich zu sehen, um einen ersten optischen Eindruck vom Gelingen der Kolorierung zu vermitteln.



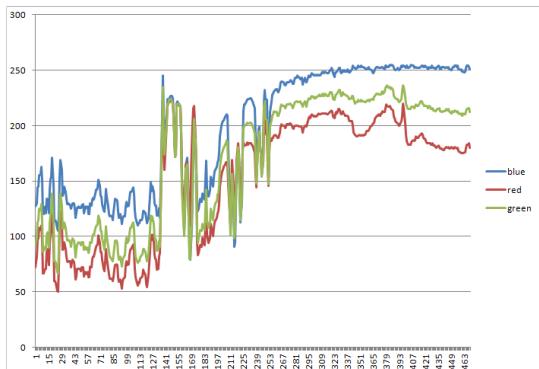
(a) Originalbild mit eingezeichnetem, untersuchtem Bereich



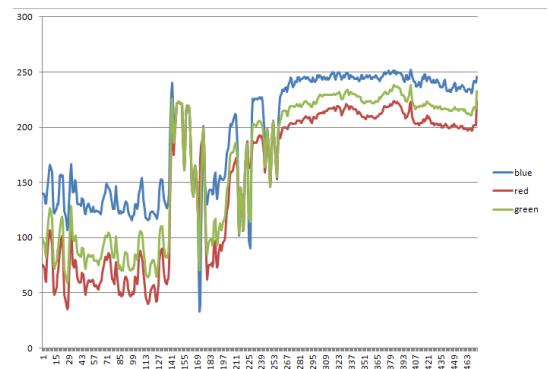
(b) eingefärbtes Bild, mit eingezeichnetem, untersuchten Bereich

Abbildung 15: Vergleich zwischen Einfärbung und Originalbild mit eingezeichneten, untersuchten Bereichen

Wie bereits bei der Einfärbung des Bildes mit der Patrone wird auch hier sowohl in der Einfärbung, als auch in dem Originalbild ein Bereich des Bildes auf dessen Farbverlauf untersucht. Erneut wurden die Rot-, Grün- und Blauwerte jedes Pixels auf der rot eingezeichneten Linie von unten nach oben in ein Diagramm geschrieben und diese Diagramme miteinander verglichen. Die daraus resultierenden Graphen sind in Abbildung 16a und 16b zu sehen.



(a) Farbverlauf des Originalbilds



(b) Farbverlauf der Einfärbung

Abbildung 16: Diagramme der entlang der Roten Linien untersuchten Lichtverläufe

Auch diese Untersuchung der Farbverläufe im Originalbild und in der Einfärbung belegen erneut das Funktionieren dieser Einfärbungsmethode.

In den Abbildungen 16a und 16b ist wiederholt deutlich zu erkennen, wie nah man mit einer Einfärbung dem Farbverlauf des Originalbildes kommen kann.

An den gezeigten Beispielen ist ersichtlich, dass das Gelingen der Einfärbungen nicht nur rein optisch sondern auch anhand der exakten Pixelwerte belegt werden kann. Es ist also mit diesem Programm möglich, Schwarz-Weiß-Bilder nicht nur einzufärben, sondern die tatsächlichen, ursprünglichen Farbverläufe zu rekonstruieren.

## 5 Kolorierung historischer Aufnahmen

Da nun die Funktion des Programms belegt werden kann, geht es um die eigentliche Aufgabe, nämlich die Kolorierung von historischen Schwarz-Weiß-Aufnahmen. In diesem Kapitel sollen zwei solche Einfärbungen näher betrachtet werden.

Zunächst wird die Einfärbung einer Aufnahme aus den Jahren 1969, auf der zwei Jungen im Meer baden, betrachtet. Dieses Schwarz-Weiß-Bild ist auf der Abbildung 17 zu sehen.

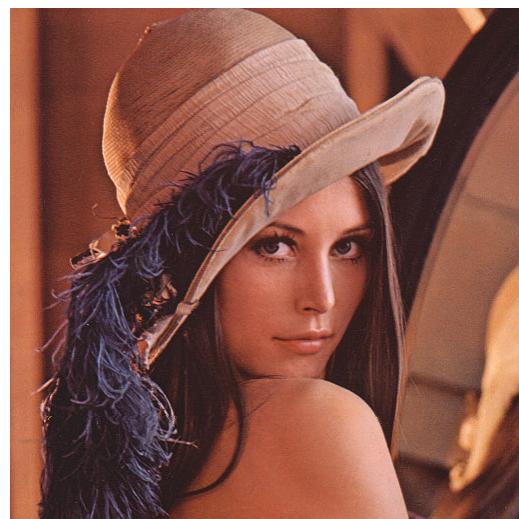


Abbildung 17: Zwei Jungen baden im Meer

Bei dieser Einfärbung wird zunächst der Himmel und das Meer mit Hilfe eines Referenzbildes eingefärbt, welches in Abbildung 18a zu sehen ist. Danach werden die Jungen mit Hilfe des Referenzbildes aus Abbildung 18b eingefärbt. Auch bei dieser Kolorierung wird der bewegliche Rahmen verwendet, um Teilbereiche des Bildes unabhängig voneinander einzufärben zu können.



(a) Referenzbild für Meer und Himmel



(b) Referenzbild für die Haut der Jungen

Abbildung 18: Referenzbilder für das Strandbild aus Abbildung 17

In Abbildung 18 sind die Referenzbilder zu sehen, die für die Einfärbung dieses Bildes benötigt werden. Mit Hilfe des Bildes Aus Abbildung 19a kann das Meer koloriert werden und für die Haut der Jungen dient das Referenzbild aus Abbildung 18b.

An dieser Stelle soll auch noch einmal die Funktionsweise der Kolorierung verdeutlicht werden, indem gezeigt wird, welche Teilbereiche des Schwarz-Weiß-Bildes mit welchen Teilbereichen des Referenzbildes eingefärbt werden.

Zu diesem Zweck sind in dem schwarz-weißen Strandbild aus Abbildung 19a alle Pixel markiert, deren Grau- beziehungsweise Helligkeitswerte zwischen 104 und 123 liegen.

Auch in dem farbigen Strandbild aus Abbildung 19b sind all die Pixel markiert, deren Helligkeitswerte zwischen 104 und 123 liegen. Wird also nun die Lookup-Table mit den Rot-, Grün und Blauwerten dieser Pixel mit den Graustufen zwischen 104 und 123 gefüllt, können damit die markierten Graustufen in dem schwarz-weißen Strandbild eingefärbt werden.



(a) Pixel der Helligkeits- bzw. Grauwerte von 104-123      (b) Pixel, die die Pixel in Abbildung 19a kolorieren

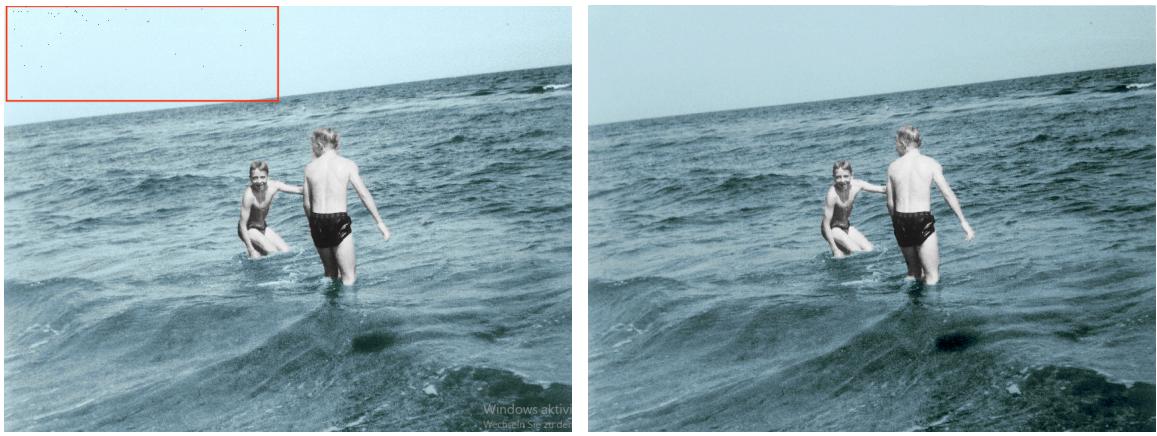
Abbildung 19: Pixel, die in beiden Bildern die gleichen Grau- bzw. Helligkeitswerte haben

Die Pixel, die in Abbildung 19a rot markiert sind, werden somit bei der Kolorierung durch die Lookup-Table mit den Farbwerten der Pixel eingefärbt, die in Abbildung 19b rot markiert sind. Auf diese Art kann zum Beispiel zunächst der Himmel und das Meer eingefärbt werden. Das Ergebnis der Einfärbung von Himmel und Meer ist in Abbildung 20 zu sehen. Hierbei wird auch noch einmal deutlich, wie wichtig die Anpassung der Lookup-Table an die Helligkeit des einzufärbenden Bildes ist, um ein Möglichst gutes Resultat bei der Kolorierung zu erzielen.

In Abbildung 20a ist zunächst die Einfärbung ohne die Anpassung zu sehen. Innerhalb der roten Markierung ist deutlich zu erkennen, dass einige Pixel nicht korrekt eingefärbt sind. Dieser Fehler tritt auf, da diesen Pixeln in der Lookup-Table für die Rot-, Grün- und Blauwerte jeweils der Wert 0 zugewiesen wird. Die Lookup-Table ist also an dieser Stelle lückenhaft, was in Kapitel 7.1 noch einmal genauer erklärt wird.

Dieser Fehler verschwindet jedoch, wie in Abbildung 20b zu sehen ist, sobald die Lookup-Table um die Differenz der Helligkeiten aus Referenzbild und einzufärbendem Bild verschoben wird. In diesem Fall beträgt die Differenz zwischen Referenzbild und Schwarz-Weiß-Bild den Wert -27. Die Lookup-Table wird also von dem Programm um 27 Stellen nach rechts verschoben, um diesen Unterschied auszugleichen.

Da nun die Lookup-Table an die Helligkeit des einzufärbenden Bildes angeglichen ist, bestehen keinerlei Probleme mehr, das Bild fehlerfrei einzufärben. In Abbildung 20b ist deutlich zu erkennen, dass es keinerlei falsch kolorierte Pixel mehr in dem Bild gibt.



(a) Fehlerhafte Kolorierung

(b) verbesserte Einfärbung

Abbildung 20: Verbesserte Einfärbung durch Lookup-Table-Verschiebung

Nach der Kolorierung des Himmels und des Wassers kann das Referenzbild aus Abbildung 18b auf die Körper der Jungen angewandt werden.

Beim Kolorieren stellen weder das Einfärben des Himmels, des Wassers, noch die Körper der Jungen irgendwelche Probleme da. Denn es ist sehr einfach, geeignete Referenzbilder dafür zu finden, da von vornherein eindeutig klar ist, welche Farben diese Bereiche in dem Bild haben müssen. Auch an Referenzbildern für Himmel, Meerwasser und Hautfarbe mangelt es nicht und es ist sehr einfach, geeignete Bilder zu finden. In diesem Fall stellen lediglich die Badehosen der Jungen ein Problem dar, da aus dem Schwarz-Weiß-Bild heraus keine Vermutungen angestellt werden können, welche Farbe diese haben. Doch da mein Vater einer der Jungen auf dem Strandbild ist, ist bekannt, dass die Badehosen blau sind. Daher ist es möglich, die Hosen mit dem Referenzbild einer schlichten, blauen Oberfläche zu koloriert. Das Ergebnis dieser Kolorierung ist in Abbildung 21 zu sehen.



Abbildung 21: eingefärbtes Bild der zwei badenden Jungen

Für eine solche Einfärbung wie in Abbildung 21 zu sehen ist, bedarf es einem Zeitaufwand von ca. einer bis anderthalb Stunden. Hierbei ist jedoch das Finden geeigneter Referenzbilder die aufwändigste Arbeit. Das reine Kolorieren stellt im Vergleich dazu einen verhältnismäßig geringen Aufwand dar.

Ein Weiteres Beispiel für die Kolorierung eines Historischen Schwarz-Weiß-Bildes liefert die Einfärbung des Bildes aus Abbildung 22. Auf diesem Schwarz-Weiß-Foto, welches in den 1950er Jahren entstanden ist, ist ein Mann in einer Uniform der deutschen freiwilligen Feuerwehr vor einer Hauswand zu sehen.



Abbildung 22: Bild eines Mannes in einer Feuerwehruniform

Bei diesem Bild ergibt sich zunächst ein ähnliches Problem, wie bei den Badehosen der Jungen aus dem vorangegangenen Beispiel. Denn es ist heute schwer zu sagen, welche Farbe eine solche Uniform in den 1950er Jahren einmal hatte. Daher ist es auch sehr schwer, ein geeignetes Referenzbild zum Befüllen der Lookup-Table zu finden. Jedoch steht in diesem Fall die zu dieser Uniform gehörende Mütze zur Verfügung. Mit dieser in Abbildung 23a zu sehenden Kopfbedeckung ist es möglich, den Stoff dieser Mütze zum Einfärben der Uniform zu nutzen.

Die Hände und das Gesicht können mit dem Referenzbild eines Gesichts aus Abbildung 23b eingefärbt werden und der Balken des Hauses im Hintergrund mit dem Referenzbild aus Abbildung 23c, auf dem ebenfalls ein Balken zu sehen ist.



(a) Referenzbild für die Einfärbung der Uniform



(b) Referenzbild für Hautpartien



(c) Referenzbilder für den Balken im Hintergrund

Abbildung 23: Referenzbilder für das Schwarz-Weiß-Bild in Abbildung 22

Mit Hilfe dieser in Abbildung 23 zu sehenden Referenzbilder kann das Bild des Feuerwehrmannes eingefärbt werden. Lediglich die Kragenspiegel am Hals stellen noch eine besondere Herausforderung dar. Denn diese Uniformteile haben die gleiche Farbe wie das rote Band der Mütze in Abbildung 23a. Um die Lookup-Table lediglich mit diesem kleinen im Bild vorkommenden Bereich befüllen zu können, muss eine weitere Funktion des Programms genutzt werden, mit der man die Lookup-Table auch lediglich mit Teilbereichen eines Referenzbildes befüllen kann. Denn häufig tauchen solche Farbtöne nach Befüllen der Lookup-Table in dieser nicht auf, da sie den gleichen Helligkeitswert wie andere Farbtöne in dem Bild besitzen. Da der entsprechende Helligkeitswert in der Lookup-Table dann aber schon von einer anderen Rot-, Grün, Blaukombination besetzt ist, gehen solche Farben 'unter'.

Bei der bereits erwähnten Funktion zum Befüllen der Lookup-Table mit einem Teilbereich des Referenzbildes kann man erneut einen Rahmen durch das Referenzbild navigieren und die Lookup-Table lediglich mit den innerhalb dieses Rahmens liegenden Pixelwerten befüllen. In Abbildung 24 ist innerhalb der grünen Markierung dieser Rahmen zu sehen, der innerhalb des roten Bandes der Mütze navigiert werden kann, um die dortigen Rot-, Grün- und Blauwerte in die Lookup-Table zu laden.



Abbildung 24: Rahmen zum Befüllen der Lookup-Table mit einem Teilbereich des Referenzbildes

Durch dieses Vorgehen wird verhindert, dass zum Beispiel einer der Blautöne, dessen Helligkeit der, der Rottöne innerhalb des Mützenbandes entspricht, diese Farbtöne aus der Lookup-Table 'verdrängt'.

Auch die Lookup-Table-Verschiebung kann man lediglich auf einen solchen Teilbereich eines Referenzbildes anwenden. Dadurch ist es möglich, die Differenz des durchschnittlichen Helligkeitswertes der Pixel innerhalb des Rahmens aus dem Referenzbild und dem durchschnittlichen Helligkeitswert aus dem ganzen Schwarz-Weiß-Bildes zu bilden. Es ist aber auch möglich, die Differenz zwischen dem durchschnittlichen Helligkeitswert der Pixel innerhalb des Rahmens aus dem Referenzbild und dem durchschnittlichen Helligkeitswert der Pixel innerhalb eines Rahmens in dem einzufärbenden Schwarz-Weiß-Bild zu bilden. Die folgenden zwei Formeln sollen dies noch einmal verdeutlichen.

Zunächst die Formel, um die Differenz zwischen der durchschnittlichen Helligkeit innerhalb des Rahmens und der durchschnittlichen Helligkeit in dem gesamten einzufärbenden Bild zu bilden:

$R_{S1}$  = Summe der Helligkeitswerte aller Pixel aus dem Referenzbild innerhalb des Rahmens

$S_2$  = Summe der Helligkeitswerte aller Pixel aus dem einzufärbenden Schwarz-Weiß-Bild

$R_{M1}$  = Anzahl der Pixel in dem Referenzbild innerhalb des Rahmens

$M_2$  = Anzahl der Pixel in dem einzufärbenden Schwarz-Weiß-Bild

$$\text{Verschiebung} = \frac{R_{S1}}{R_{M1}} - \frac{S_2}{M_2}$$

Und schließlich noch die Formel, um die Differenz, beziehungsweise die Verschiebung zwischen der durchschnittlichen Helligkeit innerhalb der Rahmen sowohl im Referenzbild, als auch im einzufärbenden Bild zu errechnen:

$R_{S1}$  = Summe der Helligkeitswerte aller Pixel aus dem Referenzbild innerhalb des Rahmens

$R_{S2}$  = Summe der Helligkeitswerte aller Pixel aus dem einzufärbenden Schwarz-Weiß-Bild innerhalb des Rahmens

$R_{M1}$  = Anzahl der Pixel in dem Referenzbild innerhalb des Rahmens

$R_{M2}$  = Anzahl der Pixel in dem einzufärbenden Schwarz-Weiß-Bild innerhalb des Rahmens

$$Verschiebung = \frac{R_{S1}}{R_{M1}} - \frac{R_{S2}}{R_{M2}}$$

Durch diese Formeln ist es möglich, die Helligkeit einzelner Referenzbilder, oder auch nur Ausschnitte daraus, an ein komplettes Schwarz-Weiß-Bild anzulegen. Gleichzeitig besteht aber auch die Möglichkeit, die durchschnittliche Helligkeit von Ausschnitten aus Referenzbildern an Ausschnitte von Schwarz-Weiß-Bildern anzulegen.

Durch diese Extraktion von Teilebereichen aus Referenzbildern gelingt es zum Beispiel in Fällen wie dem der Mütze, Lookup-Tables nur mit gewissen Ausschnitten zu befüllen. In diesem Fall gelingt dadurch das Kolorieren der Kragenspiegel mit dem gewünschten Rotton.

Durch Nutzung des beweglichen Rahmens zur partiellen Einfärbung eines Schwarzweiß-Bildes und unter Verwendung der drei Referenzbilder aus Abbildung 23 gelingt die Einfärbung des Schwarz-Weiß-Bildes aus Abbildung 22. Auch hier liegt der Zeitaufwand ähnlich wie bei der Einfärbung des Strandbildes aus Abbildung 21 bei ca. 1,5 Stunden, wobei das Finden geeigneter Referenzbilder auch hier die aufwändigste Arbeit ist.

In Abbildung 25a ist das Resultat der vollständigen Einfärbung zu sehen.



(a) eingefärbtes Bild



(b) Originalbild

Abbildung 25: Einfärbung im Vergleich zum Original

## 6 Kombination mit Kantenerkennung

Bisher kann gezeigt werden, dass eine Einfärbung von Schwarz-Weiß-Bildern mittels Lookup-Tables, die mit Referenzbildern befüllt werden, möglich ist. Es ist auch deutlich geworden, dass es notwendig ist, Teilbereiche von Bildern separat zu kolorieren. Doch dieses Kolorieren von Teilbereichen soll nach Möglichkeit nicht per Hand durchgeführt, sondern von dem Programm selbst vorgenommen werden. Daher wurde das Programm mit einer Kantenerkennung kombiniert. Dadurch soll es gelingen, Schwarz-Weiß-Bilder nicht mehr mit dem beweglichen Rahmen einfärben zu müssen, sondern einzelne Objekte automatisch erkennen und einfärben zu lassen. Zu diesem Zweck nutzt das Programm eine Kantenerkennung mittels des Sobel-Operators. Die Funktionsweise der Kolorierung mittels Kantenerkennung soll an dieser Stelle anhand eines Beispiels erläutert werden.

Für eine Einfärbung mittels Kantenerkennung muss zunächst mittels Tastendruck auf 'q' der Sobel-Operator auf ein Bild angewandt werden.

In der folgenden Abbildung 26b ist eine Kantenerkennung mit dem Sobel-Operator zu sehen. Hier wurden auf einem blauen Untergrund rosaarbene Zahlen gelegt und dieses Bild in ein Schwarz-Weiß-Bild umgewandelt, um diese Zahlen mittels Kantenerkennung wieder einfärben zu können.

Dieses sehr simple Beispiel wurde gewählt, um zunächst die grundsätzliche Funktion der Kolorierung mittels Kantenerkennung einfach erklären zu können.

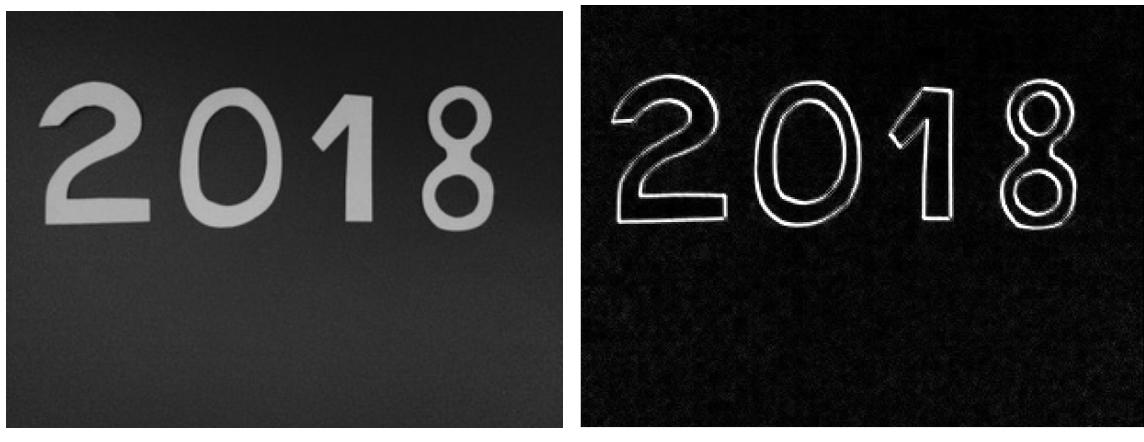


Abbildung 26: Kantenerkennung mittels Sobel-Operator

Es ist deutlich zu sehen, dass die Kanten des Bildes aus Abbildung 26a von dem Programm erkannt werden.

Mittels eines weiteren Drucks auf die Taste 'S' werden diese Kanten in eine Textdatei mit dem Namen 'borde.txt' geladen. Dies funktioniert indem das Programm das gesamte Bild mit den erkannten Kanten durchgeht und alle Pixel abspeichert, die einen vorher einzustellenden Helligkeitswert überschreiten. Dies funktioniert, da die Kanten als helle Linien dargestellt werden, im Gegensatz zu den restlichen Bereichen, die äußerst dunkel sind. Bei dem Sobel-Operator besteht jedoch das Problem, dass die Kanten nicht gleichmäßig in dem selben Weißton dargestellt werden. Auch in diesem Beispiel ist zu erkennen, dass es Kanten gibt, die heller sind, als andere. Auch kann es vorkommen, dass zum Beispiel Staub auf der Unterlage fehlerhaft als Kante erkannt und somit weiß markiert wird. Für solche Fälle ist es wichtig, dass es möglich ist einzustellen, ab welchen Helligkeitswerten eine Kante abgespeichert werden soll. So können Fehler, wie die soeben erwähnten, verringert oder sogar ganz vermieden werden.



Abbildung 27: Kantenerkennung mit starkem Rauschen im Hintergrund

In Abbildung 27 ist ein solches Rauschen, welches zum Beispiel durch Staub entstehen kann, zu sehen. Bei der Speicherung der Kanten kann dann dieses Rauschen durch die Tatsache, dass das Rauschen meist dunkler als die erkannten Kanten ist, herausgefiltert werden. Dafür muss lediglich der Wert, der festlegt, ab welcher Helligkeit die Kanten gespeichert werden sollen, größer eingestellt werden, als die Helligkeitswerte des Rauschens. Jedoch muss darauf geachtet werden, dass dabei nicht auch die tatsächlichen Kanten, die korrekt erfasst sind, herausgefiltert werden.

In der besagten Textdatei sind dann nach dem Tastendruck auf 'S' alle Pixel, die den voreingestellten Helligkeitswert überschreiten als 1 und alle Pixel, die darunter liegen als 0 gespeichert.

Nun wechselt man von dem Bild mit den erkannten Kanten wieder zurück auf das ursprüngliche, einzufärbende Schwarz-Weiß-Bild (siehe Abbildung 26a) und wendet mittels Tastendruck auf 'D' die Kolorierung innerhalb der Kanten an. Hierzu geht das Programm das gesamte einzufärbende Bild von oben nach unten Zeile für Zeile von links nach rechts durch. In jeder Zeile wird erst dann mit der Kolorierung begonnen, wenn in der Textdatei 'border.txt' auf eine gefundene 1 wieder eine 0 folgt. Beendet wird die Einfärbung in der jeweiligen Zeile, wenn wiederum auf eine gefundene 1 eine 0 folgt. Dieses Vorgehen hat den folgenden Hintergrund:

Es ist nämlich aufgefallen, dass die Kanten teilweise unterschiedlich dick sind. So kann es vorkommen, dass manche Kanten zwei Pixel dick sind oder sogar drei bis vier. Wenn in einem solchen Fall mit einer Kolorierung bei der ersten gefundenen 1 begonnen und bei der zweiten gefundenen 1 aufgehört würde, so würde nach der Kante keine Einfärbung stattfinden, da das Programm durch die zwei Pixel breite Kante irritiert wurde.

Mit dem Beginn und Ende der Einfärbung nach den Kanten werden solche Irrtümer vermieden und das Einfärbungsergebnis deutlich verbessert. In Abbildung 28 ist das mittels Kantenerkennung eingefärbte Bild zu sehen. Da es in diesem Fall nicht unbedingt um das Kolorieren mit der richtigen Farbe geht, sondern lediglich um das automatische Beschränken der Kolorierung auf Teillbereiche des Bildes, werden das Referenzbild und das Originalbild an dieser Stelle nicht miteinander verglichen.



Abbildung 28: Mittels Kantenerkennung eingefärbtes Schwarz-Weiß-Bild

Bei der in Abbildung 28 dargestellten Einfärbung ist zu sehen, dass die Kolorierung mittels Kantenerkennung zwar nicht perfekt, aber dennoch erstaunlich gut funktioniert. Die Fehler, die bei der Einfärbung entstehen sind durch Probleme bedingt, die der Sobel-Operator mit sich bringt.

So kommt es mitunter vor, dass Kanten nicht gleichmäßig gut erkannt werden und auch das besagte Rauschen kann fehlerhafte Einfärbungen verursachen. Aber auch weitere Einfärbungen mit dem Sobel-Operator belegen, dass die Funktion des automatischen Einfärbens grundsätzlich mit dem Programm kombiniert werden kann.

In einem weiteren Beispiel soll gezeigt werden, dass die Kolorierung mittels Kantenerkennung auch auf das Schwarz-Weiß-Bild des Feuerwehrmanns aus Abbildung 22 angewandt werden kann.

Dazu wurde ein Teilbereich des Bildes ausgeschnitten, um ihn mit der soeben beschriebenen Technik zu kolorieren.



(a) Ausschnitt aus dem Schwarz-Weiß-Bild des Feuerwehrmanns



(b) Teilbereich, der ausgeschnitten wurde

Abbildung 29: Ausschnitt aus einem Schwarz-Weiß-Bild

In Abbildung 29a ist der Ausschnitt aus dem Bild in Abbildung 29b zu sehen, der für diesen Versuch verwendet wurde.

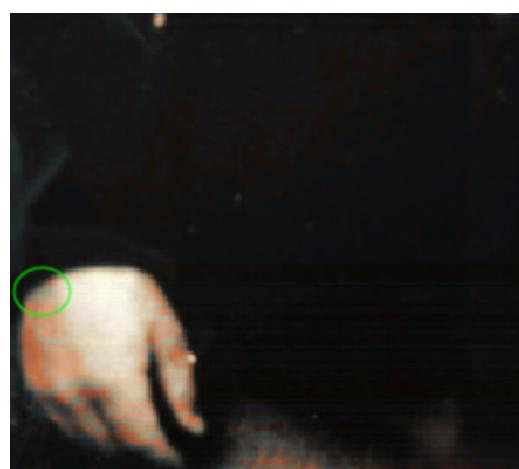
Das gesamte Bild mittels Sobel-Operator einzufärben ist nicht möglich, da zum Beispiel auf der Uniform zu viele Kanten erkannt werden. So würden zum Beispiel jeder Knopf, der Gürtel und unter Umständen auch einzelne Nähte auf der Uniform als Kanten erkannt. Damit wäre es nötig, jedes dieser Objekte einzeln einzufärben, was jedoch nicht gewünscht ist.

Für solche komplette Einfärbungen bedarf es einer deutlich verbesserten Kantenerkennung, bei der man eventuell auch wählen kann, ob innerhalb eines Objektes wie zum Beispiel der Uniform-Jacke noch weitere Objekte wie die Knöpfe und der Gürtel erkannt werden sollen oder nicht. Dies ist jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Aber in dem folgenden Bild ist zu sehen, dass solche relativ einfachen Objekte, wie zum Beispiel eine Hand mittels des Sobel-Operators recht gut eingefärbt werden können.



(a) erkannte Kanten der Hand



(b) Einfärbung der Hand

Abbildung 30: mittels Kantenerkennung kolorierte Hand

In Abbildung 30b ist deutlich zu erkennen, dass die Kolorierung mit den Kanten der Hand beginnt beziehungsweise aufhört. Zwar gibt es auch hier ein paar Stellen, wo die Kanten der Hand nur sehr schwach erkannt werden, wodurch graue Stellen auf der Hand entstehen, aber auch dies könnte mit einer verbesserten Kantenerkennung zukünftig behoben werden.

Eine solche schwach erkannte Stelle besteht zum Beispiel in Abbildung 30a innerhalb der grünen Markierung. In diesem Bereich scheint es eine Lücke in der erkannten Vorderkante der Hand zu geben. Doch dieser Eindruck täuscht, denn auch an dieser Stelle wird eine Kante an der Hand erkannt. Sie wird von dem Sobel-Operator allerdings nur so schwach erkannt, dass sie nach dem bereits beschriebenen, notwendigen Herausfiltern des Rauschens nicht mehr als Kante abgespeichert wird. In Abbildung 30b ist dann das Resultat zu sehen, dass dieser Bereich nicht koloriert wird, da der Algorithmus, wenn er diese Zeilen von links nach rechts durchgeht, den Beginn der Hand nicht erkennen kann.

Mit dem Bild des Feuerwehrmannes wurde noch ein weiterer Versuch bezüglich einer Kolorierung mittels Kantenerkennung durchgeführt. In Abbildung 32 ist der Bildausschnitt der linken Hand zu sehen, die ebenfalls mittels Sobel-Operator koloriert wurde.



(a) Ausschnitt aus dem Schwarz-Weiß-Bild des Feuerwehrmanns

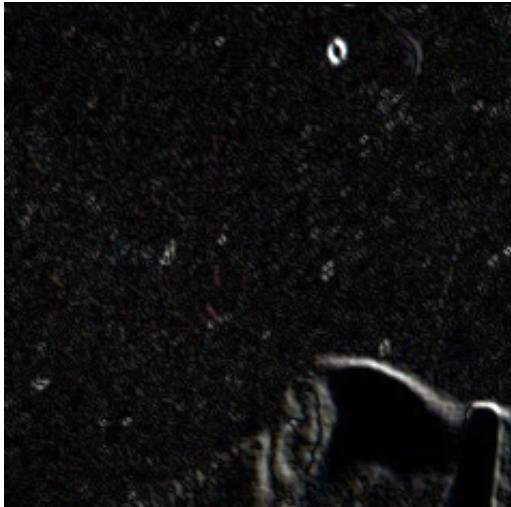


(b) Teilbereich, der ausgeschnitten wurde

Abbildung 31: Ausschnitt aus einem Schwarz-Weiß-Bild

Auch in diesem Fall wurde der Teilbereich der Hand, Abbildung 31a, aus dem Originalbild in Abbildung 31b ausgeschnitten, um es mittels der Kantenerkennung zu kolorieren. Doch in diesem Bereich des Schwarz-Weiß-Bildes ist die Bildqualität für eine wirklich gute Kantenerkennung nicht hoch genug. In Abbildung 31a fällt eine leichte Unschärfe auf, die die Kanten der Hand und der Uniform-Jacke verschwimmen lässt. Das Resultat einer Kantenerkennung mittels Sobel-Operator bei diesem Bildausschnitt ist in Abbildung 32a zu sehen. Es fällt auf, dass die Kanten der Hand zum großen Teil äußerst schwach erkannt werden. Dies stellt jedoch ein großes Problem dar. Denn wie bereits beschrieben, muss das Rauschen in dem Bild mit einem einzustellenden Wert herausgefiltert werden, um keine fehlerhaften Einfärbungen zu erhalten. In solchen Fällen wie in Abbildung 31a haben die erkannten Kanten jedoch nahezu die gleichen Helligkeitswerte, wie das in dem Bild vor kommende Rauschen. Dadurch werden sie entweder nach der Einstellung des Filterwerts nicht als Kanten abgespeichert, oder aber das Bild wird bei zu niedrigem Filterwert falsch koloriert.

Aus diesem Grund kommt das schlechte Einfärbungsergebnis aus Abbildung 32b zustande.



(a) schlecht erfasste Kanten der Linken Hand



(b) Einfärbungsergebnis

Abbildung 32: schlechte Einfärbung der linken Hand

Es wird somit deutlich, dass eine Kolorierung mittels Sobel-Operator möglich ist, aber relativ schnell an ihre Grenzen stößt. Besonders bei einer schlechten Qualität von Aufnahmen werden Kanten mitunter nur sehr schwach erkannt, was eine gute Einfärbung unmöglich macht. Doch anhand der gezeigten Beispiele kann belegt werden, dass das Programm grundsätzlich mit einer Kantenerkennung kombiniert werden kann und mit Hilfe des Sobel-Operators konnten schon erste Erfolge erzielt werden.

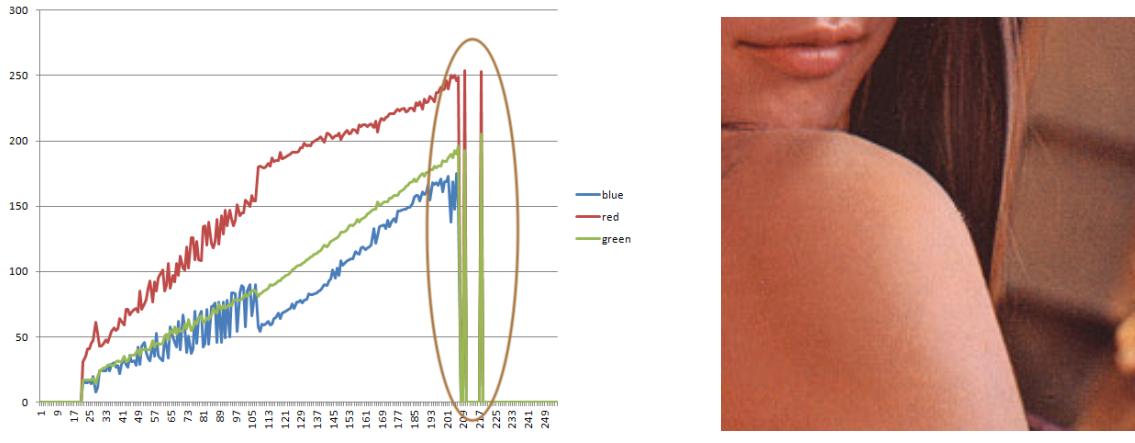
Aber für komplexere Aufnahmen und Bilder mit schlechter Qualität benötigt es eine bessere Kantenerkennung, als die des Sobel-Operators.

## 7 Berechnung der Lookup-Table

### 7.1 lineare Berechnung

Wie bei der Einfärbung des Strand-Bildes aus Abbildung 20a bereits geschildert, kann es beim Befüllen von Lookup-Tables dazu kommen, dass diese nicht komplett gefüllt werden und somit Lücken aufweisen. Dies kann dadurch zustande kommen, wenn einzelne Graustufen in einem Referenzbild nicht vorkommen und daher nicht in die Lookup-Table aufgenommen werden können. An der Stelle dieses Grauwertes werden dann für die Rot-, Grün- und Blauwerte dieses Pixels der Wert 0 gespeichert. Soll beim Einfärben eines Schwarz-Weiß-Bildes nun genau solch ein Pixel koloriert werden, wird es aufgrund des Wertes 0 für den Rot-, Grün und Blauanteil des Pixels, schwarz eingefärbt. Dieser Effekt tritt bei der Einfärbung des Strandbildes in Abbildung 20a in Form der schwarzen Pixel innerhalb des roten Rahmens auf.

Ein Beispiel für eine solche unvollständig gefüllte Lookup-Table ist in Abbildung 33 zu sehen.



(a) Lookup-Table des Referenzbildes aus Abbildung 33b

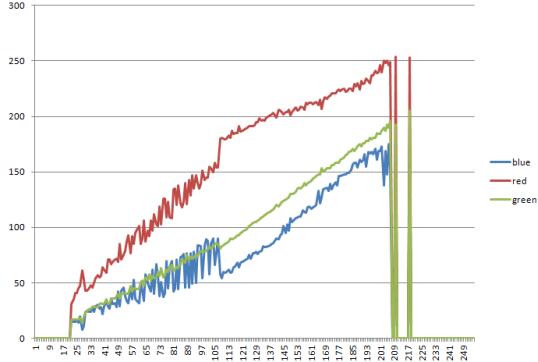
(b) Referenzbild zum Befüllen der Lookup-Table

Abbildung 33: lückenhafte Lookup-Table

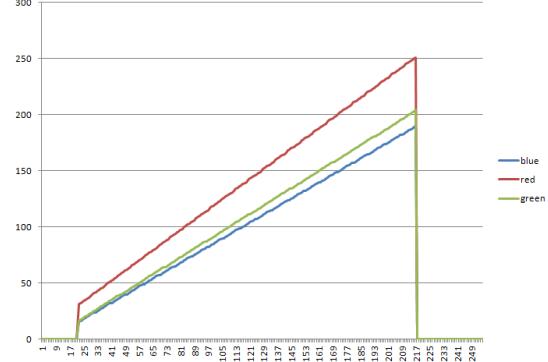
In Abbildung 33a ist die Lookup-Table zu sehen, wie sie durch das Befüllen mit den Farbwerten aus dem Bild aus Abbildung 33b entsteht. Auf der X-Achse sind die Graubereichsweise Helligkeitswerte von 0 bis 255 zu sehen, denen in Y-Richtung die drei Farbwerte Rot, Grün und Blau zugeordnet sind. Deutlich zu erkennen ist innerhalb des braun eingerahmten Bereichs die lückenhafte Lookup-Table. Solche Lücken sollen nach Möglichkeit durch eine lineare Berechnung der Lookup-Table geschlossen werden. Dadurch können dann auch den Grauwerten Rot-, Grün- und Blauwerte zugewiesen werden, die in dem verwendeten Referenzbild gar nicht vorkommen.

Zu diesem Zweck geht das Programm das Referenzbild durch und ermittelt das hellste und das dunkelste Pixel, das in diesem Bild vorkommt. Die Rot-, Grün- und Blauwerte dieser beiden Pixel werden dann an den, ihren Grauwerten entsprechenden Stellen, in der Lookup-Table gespeichert. Für die Grauwerte, die zwischen diesen beiden Pixel liegen, werden die Rot-, Grün- und Blauwerte linear berechnet und ebenfalls in die Lookup-Table geladen.

Bei dieser Methode wird die Lookup-Table also nicht mehr komplett mit Farbwerten aus dem Referenzbild gefüllt, sondern die Bereiche der Lookup-Table zwischen dem minimalen und maximalen in einem Referenzbild vorkommenden Grauwert werden linear berechnet. Durch eine solche Berechnung entsteht für das Referenzbild aus Abbildung 33b die in Abbildung 34b zu sehende Lookup-Table.



(a) Lookup-Table des Referenzbildes aus Abbildung 34b



(b) linear berechnete Lookup-Table des Referenzbildes aus Abbildung 34b

Abbildung 34: linear berechnete Lookup-Table und normal gefüllte Lookup-Table

In der Abbildung 34 ist eine linear berechnete Lookup-Table im Vergleich zu einer herkömmlich gefüllten Lookup-Table zu sehen, die vollständig mit den Pixelwerten aus dem Referenzbild gefüllt wurde. Es ist gut zu erkennen, dass sich die beiden Verläufe der Graphen deutlich voneinander unterscheiden.

Auch weitere Versuche, eine komplett gefüllte Lookup-Table linear zu berechnen, liefern ähnliche oder sogar noch schlechtere Ergebnisse.

Um zu zeigen, welche Einfärbungen mit einer linear berechneten Lookup-Table entstehen können, ist in Abbildung 35 die Einfärbung eines Automodells zu sehen. Dieses Modell wurde sowohl mit einer berechneten, als auch mit einer herkömmlich gefüllten Lookup-Table koloriert. Für die Lookup-Tables wurde in beiden Fällen das gleiche Referenzbild verwendet. Der einzige Unterschied der beiden Lookup-Tables, mit denen das Bild in Abbildung 35a und 35b eingefärbt wurde besteht darin, dass die erste durchgehend mit den Werten aus dem Referenzbild gefüllt wurde und die zweite mittels des hellsten und des dunkelsten Pixels aus dem Referenzbild linear berechnet wurde.



(a) Einfärbung mit normal gefüllter Lookup-Table



(b) Einfärbung mittels linear berechneter Lookup-Table

Abbildung 35: linear berechnete Lookup-Table und normal gefüllte Lookup-Table bei einer Einfärbung

Vergleicht man die beiden Einfärbungen aus Abbildung 35a und 35b, so fällt auf, dass die Kolorierung mit der berechneten Lookup-Table sehr unnatürlich und stark überbelichtet wirkt. Hingegen erscheint die Einfärbung mit der Lookup-Table, die komplett mit den Werten aus dem Referenzbild gefüllt wurde, sehr viel natürlicher und in ihrer Farbgebung näher am Original. Um dies noch deutlicher zu zeigen, ist in Abbildung 36 das Originalbild des Automodells zu sehen.



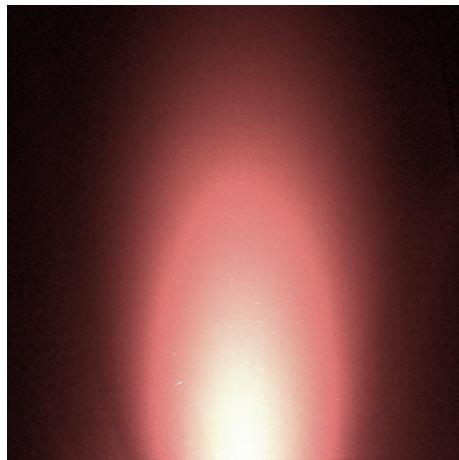
Abbildung 36: Originalbild des Automodells

Der Vergleich mit dem Originalbild aus Abbildung 36 zeigt noch einmal sehr deutlich, dass die Einfärbung mit der berechnete Lookup-Table in diesem Fall nicht so nah an das Original herankommt, wie es die Einfärbung mit der herkömmlich befüllten Lookup-Table schafft. Eine nahezu komplett befüllte Lookup-Table kann somit nicht zuverlässig mittels linearer Berechnung rekonstruiert werden.

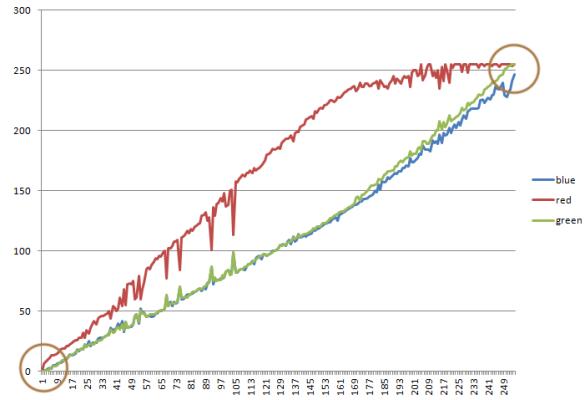
## 7.2 Untersuchung von Lookup-Tables

Da sich die lineare Berechnung von Lookup-Tables als schwierig darstellt, ist an dieser Stelle die Frage, wovon der Verlauf von Lookup-Tables abhängt.

In diesem Zusammenhang wurde eine Vielzahl an Versuchen durchgeführt. Zunächst wurden einfarbige Oberflächen untersucht, um die Lookup-Tables möglichst einfach zu halten und eine gute Vergleichsmöglichkeit zwischen den einzelnen Lookup-Tables zu erzielen. In dem folgenden Beispiel, welches in Abbildung 37 zu sehen ist, wird eine Lookup-Table von einer roten Oberfläche, die mit einer Taschenlampe beleuchtet wird, erstellt und in eine Grafik übertragen. Um sicher zu stellen, dass die Lookup-Table von den Helligkeitswerten 0 bis 255 befüllt ist, wird hier die Taschenlampe so auf die Oberfläche gehalten, dass der untere Bereich weiß erscheint und der obere Teil im Schatten liegt. Dies ist die einzige Möglichkeit, bei einer einfarbigen Oberfläche zu gewährleisten, dass die Lookup-Table vollständig gefüllt ist.



(a) rote Oberfläche zum Befüllen der Lookup-Table



(b) Lookup-Table der roten Oberfläche

Abbildung 37: Lookup-Table der roten Oberfläche

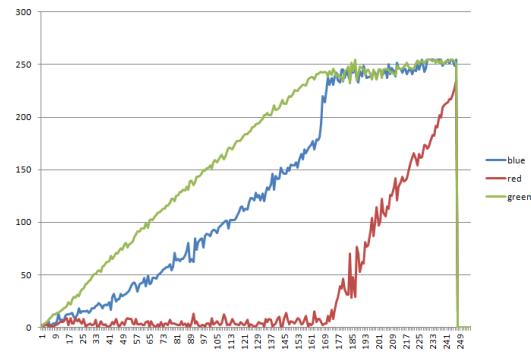
In Abbildung 37b ist deutlich der Verlauf der Lookup-Table der roten Oberfläche aus Abbildung 37a zu sehen. Bei einer genaueren Betrachtung kann man erkennen, dass es Bereiche der Lookup-Table gibt, die man als linear annehmen kann. Doch auf den gesamten Verlauf gesehen, ist dies nicht der Fall. Es ist viel mehr so, dass der Graf in den zwei markierten Punkten 0/0 und 255/255 'verankert' ist. Zwischen diesen Punkten streben die drei Werte, Rot, Grün und Blau auseinander, wodurch sich in diesen Bereichen die Farben der fotografierten Oberfläche ergeben. Je näher jedoch der Graph den Punkten 0/0 beziehungsweise 255/255 kommt, desto mehr laufen die Rot-, Grün- und Blauwerte wieder aufeinander zu.

Um die These, dass die Funktionen der Rot-, Grün- und Blauwerte in den Werten 0 und 255 'verankert' sind und Farben durch die Auslenkung der Funktionen zwischen diesen Werten nach unten beziehungsweise oben entstehen, soll an dieser Stelle eine Reihe an Versuchen betrachtet werden.

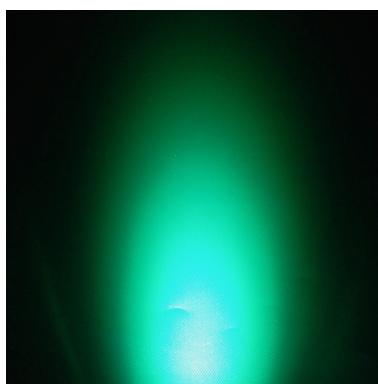
In diesen Versuchen werden ebenfalls Lookup-Tables mittels Fotos einer einfarbigen Oberfläche gefüllt, deren Farbsättigung von Mal zu Mal verringert wird. Diese Lookup-Tables sind in Abbildung 38 zu sehen. Auch hier ist der untere Bereich stark beleuchtet, sodass die Pixel dort weiß erscheinen und der obere Teil im Schatten liegt. Auch in diesem Fall kann nur so eine Lookup-Table einer einfarbigen Oberfläche generiert werden, die von den Helligkeitswerten 0 bis 255 komplett gefüllt ist.



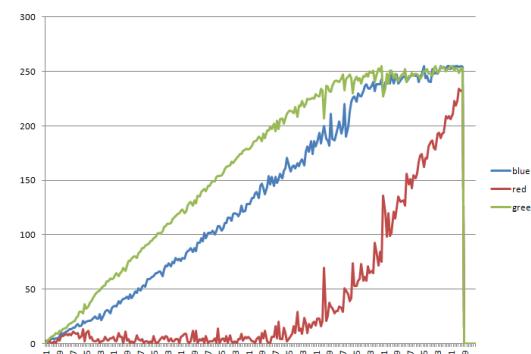
(a) Oberfläche mit höchster Farbsättigung



(b) Lookup-Table zu Abbildung 38a



(c) Oberfläche mit zweithöchster Farbsättigung

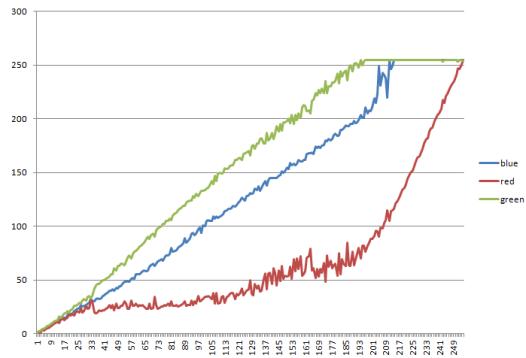


(d) Lookup-Table zu Abbildung 38c

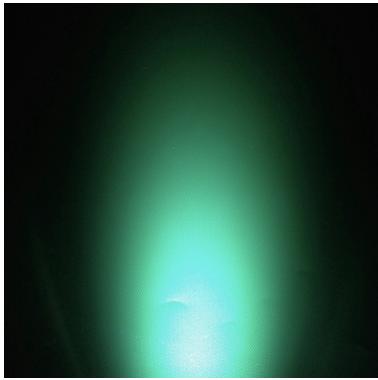
Abbildung 38: a- d, Lookup-Tables bei sinkender Farbsättigung



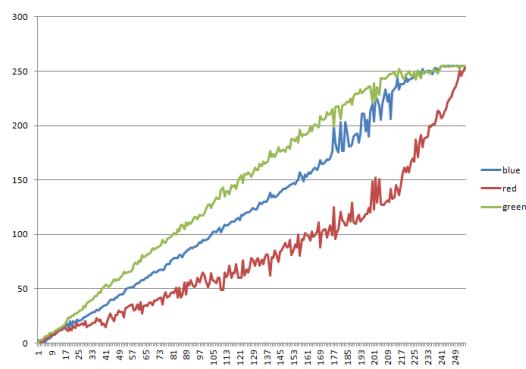
(e) Oberfläche mit mittlerer Farbsättigung



(f) Lookup-Table zu Abbildung 38e



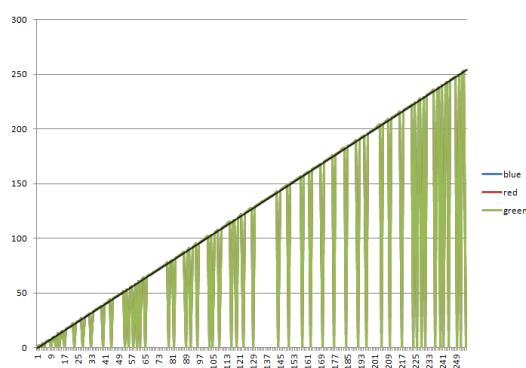
(g) Oberfläche mit zweitniedrigster Farbsättigung



(h) Lookup-Table zu Abbildung 38g



(i) Oberfläche mit niedrigster Farbsättigung



(j) Lookup-Table zu Abbildung 38i

Abbildung 38: e- j, Lookup-Tables bei sinkender Farbsättigung

In Abbildung 38h ist der bereits beschriebene Effekt gut zu sehen.

Die Lookup-Table ist in den äußersten Bereichen, also in den Punkten 0/0 und 255/255, 'verankert' und die Auslenkungen der Kurven für die Rot-, Grün- und Blauwerte werden zur Mitte der X-Achse hin maximal.

Mit sinkender Farbsättigung nähern sich die Funktionen der drei Farbwerte, Rot, Grün und Blau immer mehr einer Geraden an, die von 0/0 bis 255/255 verläuft und in Abbildung 38j als schwarze Linie eingezeichnet ist.

Hingegen steigt die Auslenkung der drei Graphen für die Rot-, Grün- und Blauwerte mit steigender Farbsättigung.

Ist die Farbsättigung schließlich soweit herabgesetzt, dass aus dem einst farbigen Bild ein Schwarz-Weiß-Bild entsteht, besteht die Lookup-Table aus drei parallelen Geraden, die

von 0/0 bis 255/255 verlaufen.

Die Änderung der Funktionen von Abbildung 38a bis 38j ähnelt sehr stark einem Springseil, dass vorne und hinten festgehalten wird und dessen Mitte zum schwingen angeregt wird. Die Farben in einer Lookup-Table entstehen also dadurch, dass es je eine Funktion für die Rot-, Grün- und Blauwerte gibt, welche in den Punkten 0/0 und 255/255 'verankert' sind und deren Verlauf oberhalb oder unterhalb der schwarz eingezeichneten Linie aus Abbildung 38j liegt.

### 7.3 lineare Berechnung von Ausschnitten der Lookup-Tables

Wie man zum Beispiel bei dem Versuch aus Abbildung 37 sehen kann, gibt es durchaus Bereiche der Lookup-Tables, die man als linear betrachten kann. Lediglich wenn man den gesamten Verlauf der Lookup-Table ansieht, fällt auf, dass sie nicht linear ist. Dies soll in Abbildung 39 verdeutlicht werden. In diesem Fall wird noch einmal die Lookup-Table aus Abbildung 38h betrachtet.

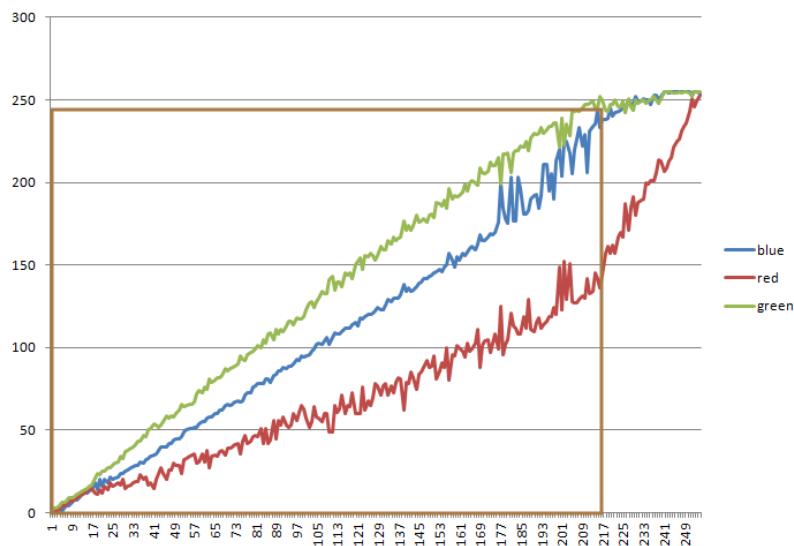


Abbildung 39: Lookup-Table aus Abbildung 37h

In Abbildung 39 ist innerhalb der braunen Markierung eindeutig ein linearer Verlauf der drei Farbkomponenten Rot, Grün und Blau zu erkennen. Die Funktionen der Rot-, Grün und Blauwerte innerhalb dieser Markierung können näherungsweise mit den folgenden Funktionen beschrieben werden:

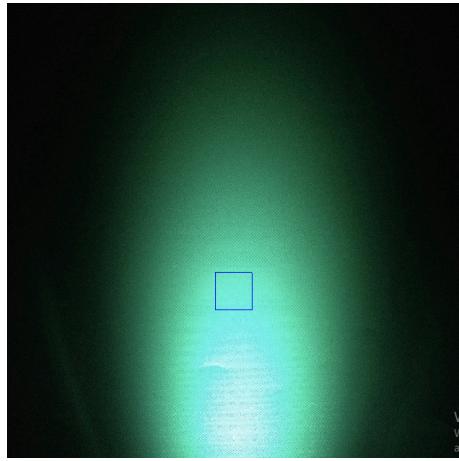
$$f(\text{rot}) = 0.619x + 1$$

$$f(\text{grün}) = 1.162x + 1$$

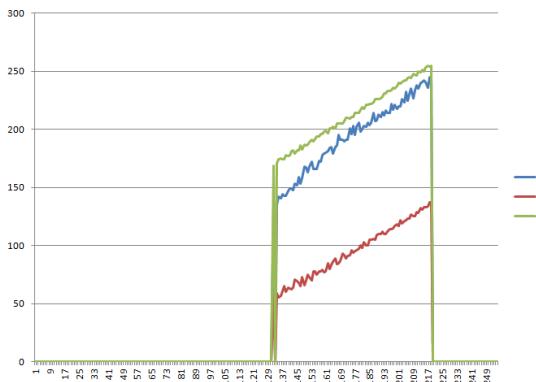
$$f(\text{blau}) = 1.043x + 3$$

Aus diesem Grund liegt die Vermutung nahe, dass Teilbereiche der Lookup-Table auch linear berechnet werden können.

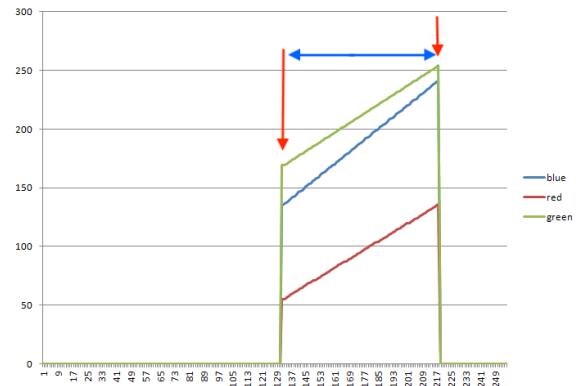
Um dies zu bestätigen, kann eine Funktion des Programms genutzt werden, die eine Lookup-Table nicht mittels eines kompletten Referenzbildes berechnet, sondern nur mit einem Ausschnitt davon. Zu diesem Zweck kann man erneut einen Rahmen durch das Bild bewegen. Befüllt man nun die Lookup-Table, wird lediglich innerhalb dieses Rahmens das Pixel mit dem minimalen Helligkeitswert und das Pixel mit dem maximalen Helligkeitswert gesucht. Die Rot-, Grün- und Blauwerte dieser beiden Pixel werden an den entsprechenden Stellen in die Lookup-Table geschrieben und die Bereiche zwischen diesen Pixeln linear berechnet. Dieses Vorgehen soll anhand der Abbildung 40 verdeutlicht werden.



(a) grüne Oberfläche mit Rahmen zum entnehmen der Werte für die Lookup-Table



(b) Lookup-Table der grünen Oberfläche innerhalb des Rahmens



(c) linear berechnete Lookup-Table der grünen Oberfläche innerhalb des Rahmens

Abbildung 40: Lookup-Table der grünen Oberfläche innerhalb des Rahmens

Die in Abbildung 40b zu sehende Lookup-Table wurde lediglich mit Werten aus dem Inneren des blauen Rahmens, der auf Abbildung 40a zu sehen ist, befüllt. Im Gegensatz dazu wurde die in Abbildung 40c zu sehende Lookup-Table linear berechnet. Auch hierfür wurde der Blaue Rahmen aus Abbildung 40a an der gleichen Position verwendet. In diesem Fall wurden zunächst das hellste und das dunkelste Pixel innerhalb des Rahmens ermittelt. Die Farbwerte für den Rot-, Grün- und Blauanteil dieser beiden Pixel wurden dann in die Lookup-Table geladen. In Abbildung 40c sind diese beiden Pixel mit roten Pfeilen gekennzeichnet. Der Helligkeitswert des niedrigeren Pixels beträgt etwa 130 und der Helligkeitswert des höherwertigen Pixels etwa 220. Abzulesen sind diese Helligkeitswerte wie auch bei den vorangegangenen Graphen der Lookup-Tables auf der X-Achse. Auf der Y-Achse sind direkt über den beiden Pixeln die dazugehörigen Rot-, Grün- und Blauwerte abzulesen. Ausgehend von diesem dunkelsten und hellsten Pixel kann nun der Bereich zwischen den beiden Pixeln linear berechnet werden. Dieser Bereich ist in Abbildung 40c mit einem blauen Pfeil gekennzeichnet.

Zu sehen ist, dass die Graphen aus Abbildung 40b und 40c sich sehr ähneln. Dies bedeutet, dass wenn das hellste und das dunkelste Pixel nah beieinander liegen, die Möglichkeit besteht, Lookup-Tables linear zu berechnen. Um dies weiter zu verdeutlichen, sind in den Abbildungen 41 und 42 noch weitere Versuche mit linear berechneten Lookup-Tables zu sehen.

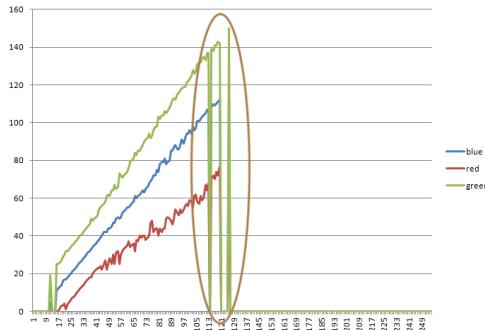
In dem Versuch aus Abbildung 41 wurde der blaue Rahmen in einen Bereich der grünen Oberfläche positioniert, wo der Helligkeitsunterschied zwischen dem hellsten und dem dunkelsten Pixel größer ist, als in dem vorangegangenen Versuch. Auch die durchschnittliche

Helligkeit in diesem Bereich ist niedriger, als in dem vorherigen Beispiel.

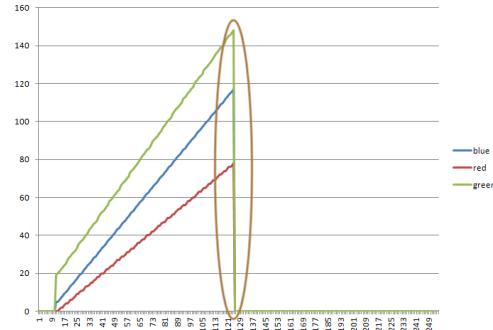
In Abbildung 41b ist die Lookup-Table zu sehen, die entsteht, wenn sie mit den Werten aus dem Inneren des Rahmens befüllt wird. In Abbildung 41c hingegen wurde die Lookup-Table erneut mit Hilfe des hellsten und des dunkelsten Pixels linear berechnet.



(a) grüne Oberfläche mit Rahmen zum entnehmen der Werte für die Lookup-Table



(b) Lookup-Table der grünen Oberfläche innerhalb des Rahmens



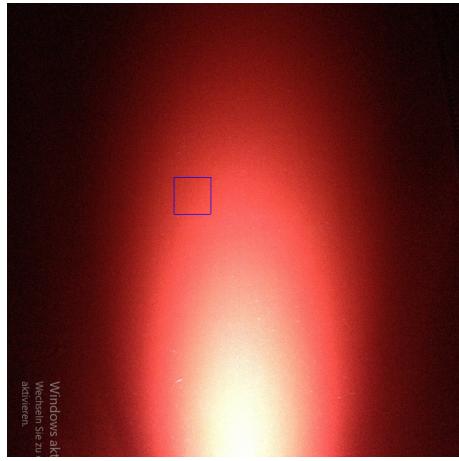
(c) linear berechnete Lookup-Table der grünen Oberfläche innerhalb des Rahmens

Abbildung 41: Lookup-Table der grünen Oberfläche innerhalb des Rahmens

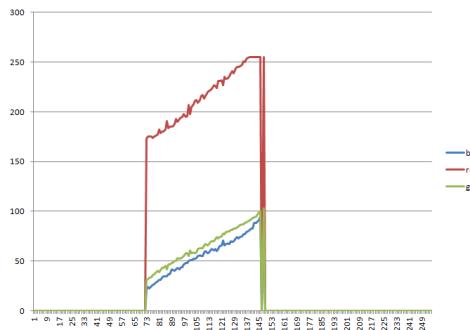
Auch in diesem Fall ist wieder zu sehen, dass sich die beiden Graphen sehr ähneln.

Betrachtet man die Bereiche innerhalb der braunen Markierung in Abbildung 41b und 41c, ist zu sehen, dass hier genau das gelingt, wozu die Berechnung der Lookup-Table gedacht ist. In Abbildung 41b ist eine deutliche Lücke zu sehen, die jedoch bei der Berechnung der Lookup-Table nicht mehr auftritt. Es ist also in diesem Fall gelungen, Lücken innerhalb einer Lookup-Table durch eine lineare Berechnung zu schließen.

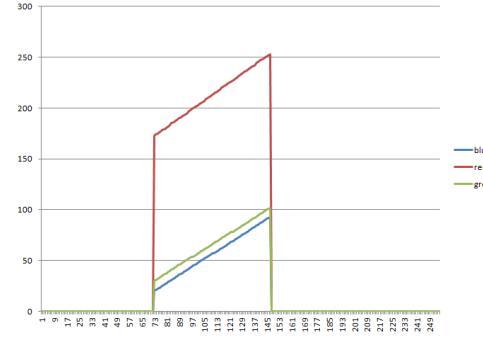
In einem weiteren Versuch, der in Abbildung 42 zu sehen ist, wird bei einer rote Oberfläche ebenfalls mittels eines Rahmens eine Lookup-Table befüllt und eine Lookup-Table linear berechnet.



(a) rote Oberfläche mit Rahmen zum entnehmen der Werte für die Lookup-Table



(b) Lookup-Table der roten Oberfläche innerhalb des Rahmens



(c) linear berechnete Lookup-Table der roten Oberfläche innerhalb des Rahmens

Abbildung 42: Lookup-Table der roten Oberfläche innerhalb des Rahmens

Auch bei den Graphen aus Abbildung 42b und 42c ist deutlich zu sehen, dass die lineare Berechnung von Lookup-Tables gelingt, vorausgesetzt, dass das hellste und das dunkelste Pixel nah beieinander liegen.

Aufgrund dieser Versuche kann die Erkenntnis gewonnen werden, dass eine Lookup-Table nur dann linear berechnet werden kann, wenn das hellste und das dunkelste Pixel nah beieinander liegen. Eine lineare Berechnung einer Lookup-Table, die mit Farbwerten für die Grauwerte von 0 bis 255 gefüllt ist, ist hingegen nicht möglich. Denn mit wachsender Differenz der Helligkeitswerte des hellsten und des dunkelsten Pixels sinkt auch die Chance, mit der linearen Berechnung eine korrekte Lookup-Table zu generieren.

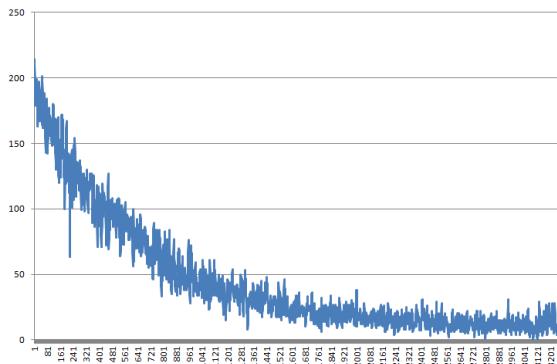
## 8 Helligkeits- und Farbverläufe in Bildern

### 8.1 Funktionen der Lichtverläufe

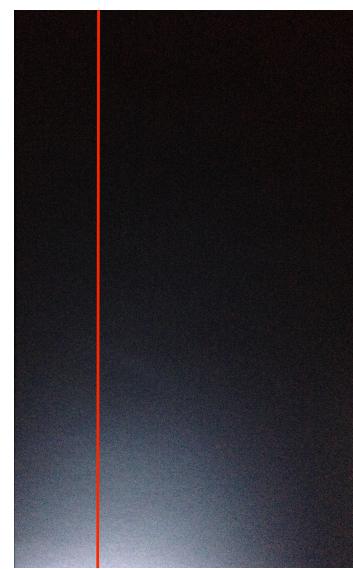
Da vollständig gefüllte Lookup-Tables meist nicht linear sondern exponentiell verlaufen, liegt die Vermutung nahe, dass auch Helligkeitswerte innerhalb von Bildern dies tun. Zu diesem Zweck wurden einige Helligkeitsverläufe in Bildern auf die gleiche Art wie in Kapitel 4.5 untersucht.

Zunächst wird der reine Helligkeitsverlauf auf einem hellen Untergrund betrachtet, auf dem die Lichtintensität vom unteren bis zum oberen Rand abnimmt.

Dieses Bild ist in Abbildung 43b zu sehen.



(a) Graf des Lichtverlaufs



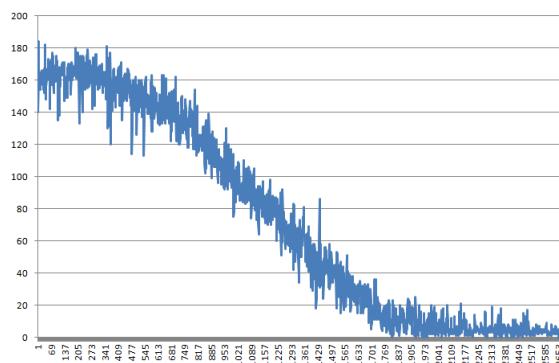
(b) entlang der roten Linie untersuchte Pixel in einem Schwarz-Weiß-Bild

Abbildung 43: Lichtverlauf von hell nach dunkel

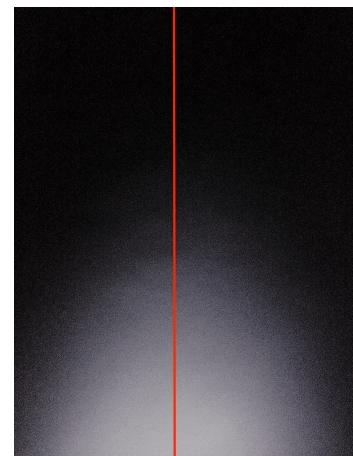
In Abbildung 43a sind auf der X-Achse die Pixel zu sehen, die in der Abbildung 43b auf der Roten Linie liegen.

Die Y-Achse in Abbildung 43a zeigt die Helligkeitswerte der Pixel auf der roten Linie an. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Lichtintensität in diesem Fall nicht linear, sondern exponentiell abnimmt. Die Funktion der Lichtintensität aus Abbildung 43a kann mit der Funktionsgleichung  $f(x) = 192 * 0.9954^x$  näherungsweise beschrieben werden.

Auch bei weiteren Versuchen mit Lichtverläufen auf weißem Untergrund fällt auf, dass die Lichtintensitäten in der Regel nicht linear, sondern exponentiell verlaufen. In Abbildung 44 ist ein weiterer Lichtverlauf dieser Art zu sehen.



(a) Graf des Lichtverlaufs



(b) entlang der roten Linie untersuchte Pixel in einem Schwarz-Weiß-Bild

Abbildung 44: Lichtverlauf von hell nach dunkel

Wie in Abbildung 44a zu sehen ist, verläuft auch dieser Graph der Lichtintensität nicht linear, sondern exponentiell. Er kann mit der Funktionsgleichung  $f(x) = 162e^{-8*10^{-7}x^2}$  näherungsweise beschrieben werden.

Auch hier entsprechen die X-Werte den Pixeln, die auf der in Abbildung 44b zu sehenden roten Linie liegen. Die Y-Werte geben den zu jedem Pixel gehörenden Helligkeitswerten wieder.

In den beiden bereits beschriebenen Versuchen zu Lichtverläufen in Bildern werden lediglich die Lichtintensitäten untersucht. In einem weiteren Versuch sollen jedoch neben der Lichtintensität auch die Farbverläufe betrachtet werden. Dazu werden entlang der roten Linie aus Abbildung 45b die Rot-, Grün- und Blauwerte jedes auf dieser Linie liegenden Pixel entnommen. Diese Daten sind in dem Diagramm aus Abbildung 45a zu sehen.

Auch in diesem Fall sind auf der X-Achse die Pixel abgebildet, die auf der roten Linie in Abbildung 45b liegen. Auch hier entspricht der linke Rand des Koordinatensystems dem unteren Rand des untersuchten Bildes. Die zu jedem Pixel gehörenden Rot-, Grün- und Blauwerte sind in Y-Richtung abzulesen.

Bei dem untersuchten Bild handelt es sich erneut um eine weiße Oberfläche, die mit einer Taschenlampe so beleuchtet wird, dass der untere Teil sehr hell und der obere Teil sehr dunkel ist.

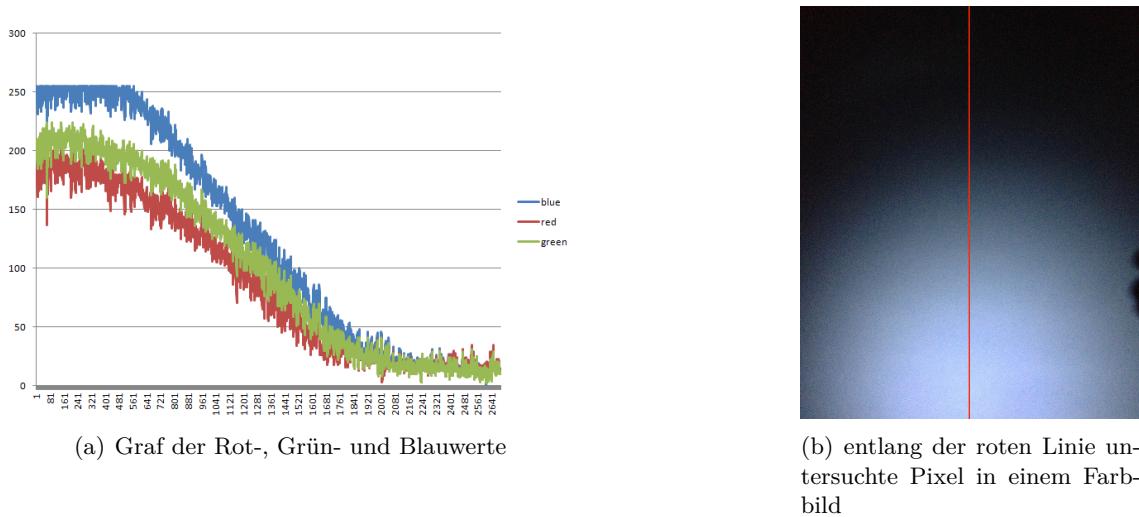


Abbildung 45: Verlauf der Rot-, Grün und Blauwerte von hell nach dunkel

Der in Abbildung 45a dargestellte Graph der drei Farbwerte Rot, Grün und Blau, ähnelt sehr stark dem Helligkeitsverlauf aus Abbildung 44a. Auch hierbei handelt es sich um Exponentialfunktionen, die mit den folgenden Funktionsgleichungen näherungsweise beschrieben werden können:

$$f_{\text{rot}}(x) = 165e^{-4,8424 \cdot 10^{-7} x^2}$$

$$f_{\text{grün}}(x) = 187e^{-5,503 \cdot 10^{-7} x^2}$$

$$f_{\text{blau}}(x) = 234e^{-5,615 \cdot 10^{-7} x^2}$$

Obwohl es gelungen ist, Funktionsgleichungen aufzustellen, mit denen die Lichtverläufe näherungsweise dargestellt werden können, ist es bislang nicht gelungen, eine eindeutige Formel zu entwickeln, anhand der Lichtverläufe in Referenzbildern generell berechnet werden können. Nach einer Reihe von Versuchen hat sich lediglich herausgestellt, dass die meisten Lichtverläufe bei gleichmäßig beleuchteten Oberflächen, wie in den geschilderten Versuchen, entweder mit einer Exponentialfunktion der Form  $f(x) = a * b^x$  wie in Abbildung 43 dargestellt werden können, oder aber wie in Abbildung 44 mit einer Funktion der Form  $f(x) = ae^{-kx^2}$ .

Jedoch kann die Erkenntnis aus diesen Versuchen gezogen werden, dass sowohl Lookup-Tables, als auch Helligkeitswerte in Bildern nicht linear, sondern exponentiell verlaufen. Selbst Licht- und Farbverläufe, die mit dem menschlichen Auge linear und gleichmäßig

erscheinen, wie auch bei den Bildern in Abbildung 43b, 44b und 45b, sind dies in Wirklichkeit nicht.

## 8.2 Berechnung von Loop-Tables mittels errechneten Lichtverläufen

Mit den gewonnenen Erkenntnissen, dass Lichtverläufe mittels Exponentialfunktionen dargestellt werden können, ist es möglich, unter bestimmten Voraussetzungen, Lichtverläufe zu berechnen. Es ist also möglich, wie in den vorangegangenen Versuchen auch, mit dem Programm zu einer bestimmten X-Koordinate in dem zu untersuchenden Bild zu gehen und sich den Helligkeits-, beziehungsweise Farbverlauf ausgeben zu lassen. Dies geschieht bei den nun folgenden Versuchen jedoch nicht durch abtasten sämtlicher Pixel, die auf einer Linie von unten nach oben in dem Bild vorkommen. Es ist vielmehr so, dass das Programm entlang der gewählten X-Position alle Pixel vom unteren Rand des Bildes bis zu dessen oberen Rand durchgeht und das hellste und das dunkelste Pixel ermittelt. Die Zwischenräume, die nun noch zwischen diesen beiden Pixeln mit Farbwerten gefüllt werden müssen, werden mit Hilfe der Funktion  $f(x) = a * b^x$  exponentiell berechnet. Hierzu werden zunächst die Parameter  $a$  und  $b$  mit Hilfe der bereits bekannten Pixel von dem Programm berechnet, ehe die Werte für die Lichtverläufe ermittelt werden können.

Anhand der folgenden Abbildung soll dieser Vorgang veranschaulicht werden.

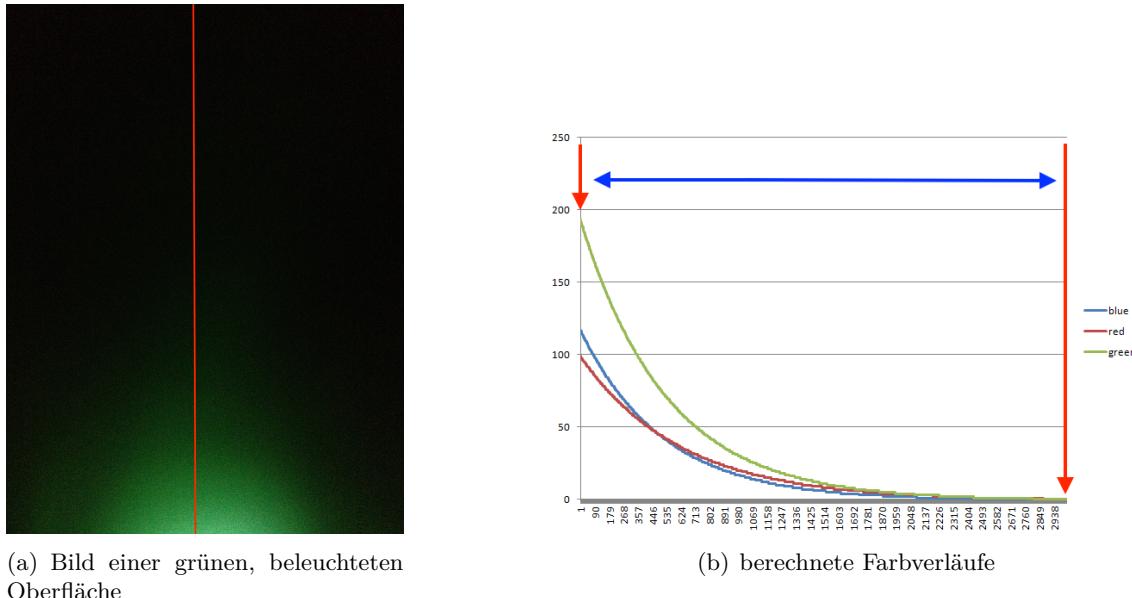


Abbildung 46: Berechnung der Farbverläufe eines Referenzbildes

In diesem Fall sucht das Programm entlang der rot eingezeichneten Linie in Abbildung 46a das hellste und das dunkelste Pixel heraus und speichert diese ab. Die besagten Pixel sind in Abbildung 46b mit zwei roten Pfeilen markiert. Der Bereich zwischen diesen beiden Pixeln, der in Abbildung 46b mit einem blauen Pfeil gekennzeichnet ist, wird dann anhand der bereits erwähnten Funktion exponentiell berechnet. In der folgenden Abbildung soll gezeigt werden, wie nah man in diesem Fall dem tatsächlichen Farbverlauf in dem Bild 46a kommen kann. Hierzu werden ebenfalls entlang der in Abbildung 46a zu sehenden, roten Linie, alle Pixelwerte abgetastet und in ein Diagramm übertragen.

Auf diese Art können die berechneten Farbverläufe mit den tatsächlichen verglichen werden.

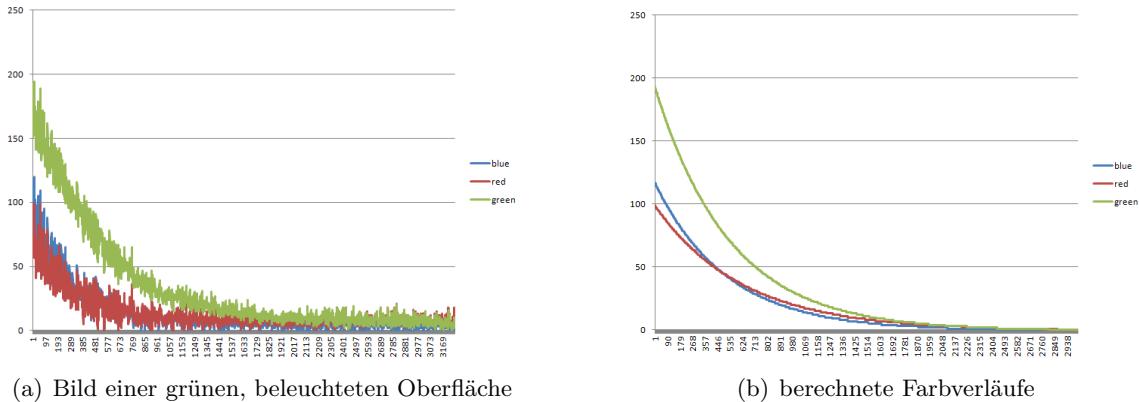


Abbildung 47: Berechnung der Farbverläufe eines Referenzbildes

Betrachtet man die Graphen der Lichtverläufe aus Abbildung 47a und 47b, so fällt auf, dass die Berechnung in diesem Fall sehr nah an den tatsächlichen Lichtverlauf herankommt. Lediglich das Rauschen kann hierbei nicht wiedergegeben werden.

Mit einem solchen berechneten Farbverlauf kann man nun natürlich auch Lookup-Tables befüllen. Dies ist also eine zweite Möglichkeit, wie man eine Lookup-Table mit berechneten Werten füllen kann. Zu diesem Zweck wird nicht die Lookup-Table selbst berechnet, sondern der Lichtverlauf des Referenzbildes, mit dem diese gefüllt wird.

Zu diesem Zweck speichert das Programm die berechneten Lichtverläufe ab und man kann mittels Tastendruck die Lookup-Table mit diesen Werten befüllen lassen. Das Programm geht hierzu nun nicht mehr direkt das Referenzbild durch, sondern die gespeicherten Werte aus den berechneten Farbverläufen. Das Ergebnis einer solchen Lookup-Table ist in Abbildung 48 zu sehen.

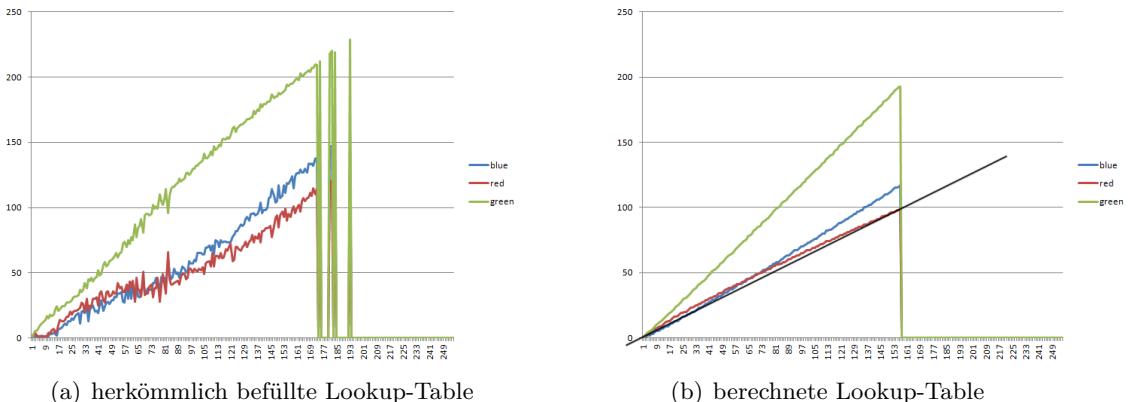
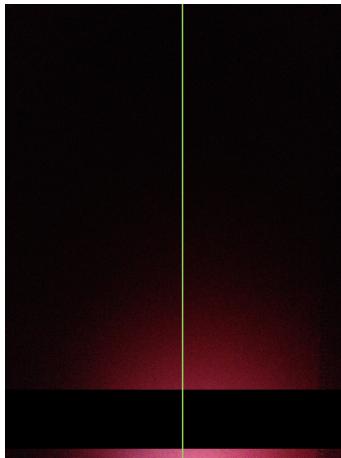


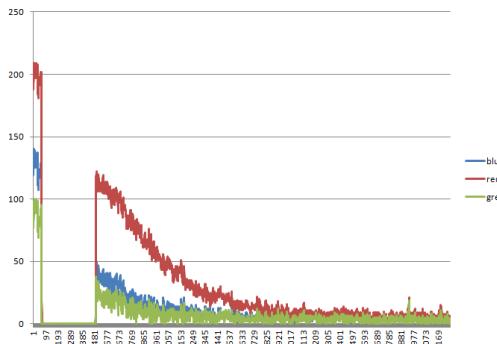
Abbildung 48: mittels berechneter Lichtverläufe befüllte Lookup-Table

In Abbildung 48 ist zu sehen, dass es auch auf diese Art möglich ist, eine Lookup-Table zu generieren, die relativ nah an die originale, herkömmlich befüllte Lookup-Table herankommt. Natürlich bestehen zwischen der in Abbildung 48b zu sehenden, berechneten Lookup-Table und der in Abbildung 48a zu sehenden herkömmlich befüllten Lookup-Table Unterschiede, aber die grundsätzliche Tendenz der Verläufe der Graphen ist sehr ähnlich. Vor allem ist es aber gelungen, keine ausschließlich lineare Lookup-Table mehr zu berechnen, wie in Kapitel 7.3. Um dies zu zeigen, ist in Abbildung 48b bei der Funktion, die den Rotanteil darstellt, eine schwarze Gerade angelegt, um zu verdeutlichen, dass die berechnete Lookup-Table nicht linear ist.

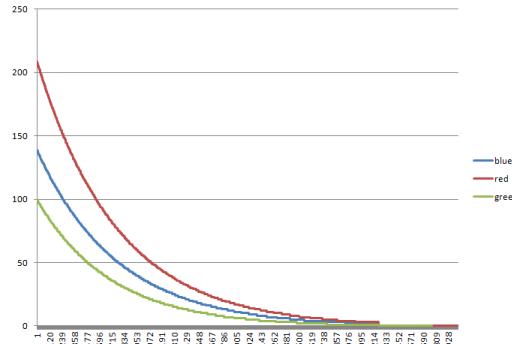
In dem folgenden Beispiel soll noch einmal gezeigt werden, welche Vorteile eine Berechnung von Lichtverläufen und damit einhergehendes Befüllen von Lookup-Tables haben kann. Zu diesem Zweck ist ein Bereich in dem Referenzbild geschwärzt, sodass diese Helligkeitswerte bei einem Abtasten nicht erfasst werden können.



(a) Bild mit geschwärztem Bereich



(b) abgetasteter Farbverlauf

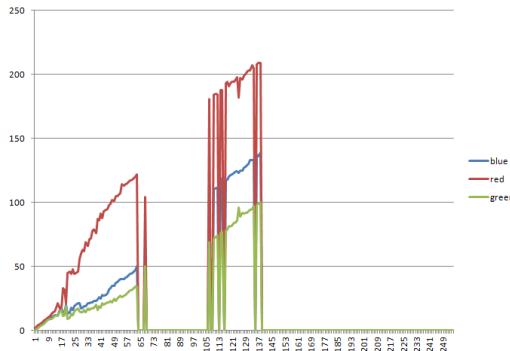


(c) exponentiell berechneter Farbverlauf

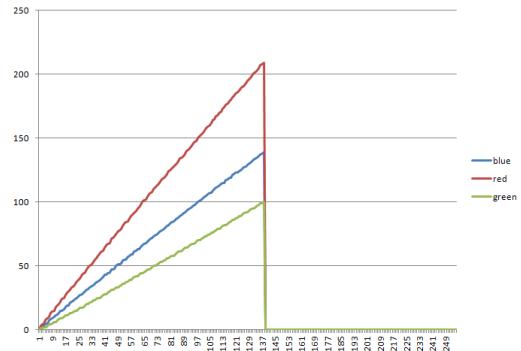
Abbildung 49: durch Berechnung geschlossene Lücke eines Lichtverlaufs

In Abbildung 49a ist das Bild einer roten Oberfläche zu sehen, die mit einer Lampe so beleuchtet ist, dass der untere Bereich sehr hell und der obere Bereich sehr dunkel ist. Zusätzlich ist in dem unteren Bereich ein schwarzer Balken eingefügt, um eine Lücke im Farbverlauf des Bildes zu erzeugen.

In Abbildung 49b ist der Farbverlauf zu sehen, der entsteht, wenn das Programm die Rot-, Grün und Blauwerte jedes Pixels auf der in Abbildung 49a zu sehenden grünen Linie abtastet und speichert. Auch in diesem Fall sind auf den Diagrammen in Abbildung 49b auf der X-Achse die Pixel zu sehen, die auf der grünen Linie liegen und in Y-Richtung ist jedem dieser Pixel dessen Rot-, Grün und Blauwert zugewiesen, woraus sich die Farben jedes einzelnen Pixels zusammensetzen. Deutlich zu sehen ist, dass durch das Einfügen des schwarzen Balkens in Abbildung 49b eine Lücke in den abgetasteten Lichtverläufen entsteht. Eine solche Lücke kann nur durch eine Berechnung der Rot-, Grün und Blauwerte geschlossen werden. Dies ist in Abbildung 49c zu sehen. In diesem Fall werden entlang der in Abbildung 49a zu sehenden, grünen Linie das hellste und das dunkelste Pixel ermittelt, abgespeichert und die Zwischenräume wie auch in dem vorangegangenen Beispiel exponentiell anhand der Formel  $f(x) = a * b^x$  berechnet. Es wird deutlich, dass durch die Berechnung der Farbverläufe die in Abbildung 49b zu sehende Lücke in Abbildung 49c geschlossen werden kann. Durch eine solche Berechnung können dann wiederum Lücken in einer Lookup-Table geschlossen werden. Dies soll anhand der folgenden Abbildung verdeutlicht werden.



(a) anhand der abgetasteten Lichtverläufe befüllte Lookup-Table



(b) anhand der berechneten Lichtverläufe befüllte Lookup-Table

Abbildung 50: geschlossene Lücken in einer Lookup-Table

Auch bei diesen Lookup-Tables in Abbildung 50a und 50b sind auf der X-Achse die Grauwerte abzulesen, denen in Y-Richtung eine Kombination aus Rot, Grün und Blau zugewiesen ist. In Abbildung 50a ist eine Lookup-Table zu sehen, wie sie entsteht, wenn sie mit den Werten aus den abgetasteten Lichtverläufen aus Abbildung 49b gefüllt wird. Die Lücke, die in den Lichtverläufen aufgrund des schwarzen Balkens auftritt, sorgt auch bei der Lookup-Table aus Abbildung 50a für eine Lücke. Dadurch können den Grauwerten im Bereich von ca. 70 bis 105 auf der X-Achse, keine Farbwerte in Form einer Rot-, Grün- Blaukombination zugeordnet werden. Solche Pixel würden bei einer Einfärbung dann schwarz eingefärbt. Anders ist es da bei der Lookup-Table in Abbildung 50b. In diesem Fall wird die Lookup-Table mit den Werten der berechneten Lichtverläufen gefüllt. Zu diesem Zweck geht das Programm die gespeicherten Werte aus Abbildung 49c durch, die aus der Berechnung der Lichtverläufe entstanden sind. Diese drei Farbwerte werden zunächst in drei Arrays gespeichert. Diese Arrays geht das Programm nun von vorne nach hinten durch. Beginnend mit der Position 0 der Arrays berechnet das Programm, welcher Grauwert sich aus der Kombination des Rotwerts an Stelle 0 im Rotwert-Array, des Grünwerts, an Stelle 0 im Grünwert-Array und des Blauwertes an Stelle 0 im Blauwert-Array ergibt. In der Lookup-Table wird dann an dieser Stelle des Grauwerts die Kombination aus Rot-, Grün- und Blauwerten gespeichert. Auf diese Weise geht das Programm die drei Arrays, mit den Werten aus den berechneten Lichtverläufen, parallel durch und gefüllt somit die Lookup-Table.

Es wird also deutlich, dass es bis zu einem gewissen Grad möglich ist, Licht- und Helligkeitsverläufe exponentiell zu berechnen, um damit Lookup-Tables zu füllen. Jedoch bedarf es noch weiterer Forschungen, um herauszufinden mit welchen Funktionen genau man solche Verläufe berechnen kann. Bisher hat sich gezeigt, dass die meisten Licht- und Farbverläufe von gleichmäßig beleuchteten Oberflächen mit den Funktionen  $f(x) = a * b^x$  beziehungsweise  $f(x) = ae^{-kx^2}$  näherungsweise berechnet werden können. Doch künftig könnte eine solche Berechnung noch besser gelingen, wenn man genauere Kenntnisse über die Verläufe von Helligkeiten und Farbwerten gewinnen würde. So wäre zum Beispiel die Frage zu klären, ob das Rauschen, was bei den hier gezeigten Rechnungen nicht beachtet wird, durch eine bestimmte Form von Oberschwingungen bedingt ist. Könnte man auch dieses Rauschen zum Beispiel durch eine Sinusfunktion darstellen, könnte eine noch exaktere Berechnung von Licht- und Helligkeitsverläufen gewährleistet werden. Im gleichen Zuge würde auch die Qualität der mit den berechneten Werten gefüllten Lookup-Tables verbessert.

## **9 Zusammenfassung**

In dieser Arbeit ging es um die Frage, ob es möglich ist, Schwarz-Weiß-Aufnahmen nachträglich zu kolorieren und inwiefern dieser Prozess automatisiert werden kann.

Als Ergebnis zu diesen Fragen kann festgehalten werden, dass es möglich ist, mit Hilfe von Referenzbildern Schwarz-Weiß-Bilder einzufärben. Hierbei ist es jedoch erforderlich, eine gewisse Ahnung davon zu haben, welche Farben in dem zu kolorierenden Bild vorkommen. Auch eine Kombination mit einer Kantenerkennung ist möglich und liefert bereits erste Teilerfolge. Für eine wirklich zuverlässige Kantenerkennung und eine damit einhergehende unabhängige Kolorierung von Objekten in einem Bild wird jedoch noch eine Bessere Kantenerkennung benötigt, als sie der Sobel-Operator bisher bietet.

Auch eine Berechnung von Lookup-Tables ist in Teilen gelungen. Jedoch benötigt es noch weitere Forschungen zum Thema Helligkeits- und Farbverläufe, um genauere Funktionen aufzustellen zu können, anhand derer man Lichtverläufe berechnen kann. Je genauer man in Zukunft Lichtverläufe berechnen kann, desto genauer werden auch die damit befüllten Lookup-Tables werden.

Es wird also deutlich, dass die Möglichkeit besteht, Schwarz-Weiß-Bilder nachträglich einzufärben. Doch Teilbereiche, wie zum Beispiel die Berechnung von Lookup-Tables und eine verbesserte Kantenerkennung bedürfen auch in Zukunft noch einiger Untersuchungen und weiterer Forschung, um noch bessere Ergebnisse erzielen zu können.

## 10 Funktionen der Programme

### 10.1 Programm 'automatische LT-Verschiebung'

Taste	Funktion
p	Lookup-Table mit den Werten aus dem aktuellen Referenzbild befüllen
e	Lookup-Table mit den Werten aus dem aktuellen Referenzbild befüllen, die innerhalb des durch das Bild bewegten Rahmens liegen
#	Einfärben des kompletten aktuellen Bildes unter Verwendung der Lookup-Table
u	Einfärben eines Teilbereichs des aktuellen Bildes unter Verwendung der Lookup-Table innerhalb des aktuellen, beweglichen Rahmens
w, a, s, d	Bewegen des Rahmens durch das aktuelle Bild
8	Einfärben des aktuellen Bildes von der aktuellen X-Position des Rahmens bis zum linken Rand des Bildes. Die Einfärbung geschieht auf der aktuellen Breite des Rahmens
9	Einfärben des aktuellen Bildes von der aktuellen X-Position des Rahmens bis zum rechten Rand des Bildes. Die Einfärbung geschieht auf der aktuellen Breite des Rahmens
i	Einfärben des aktuellen Bildes von der aktuellen Y-Position des Rahmens bis zum unteren Rand des Bildes. Die Einfärbung geschieht auf der aktuellen Breite des Rahmens
o	Einfärben des aktuellen Bildes von der aktuellen Y-Position des Rahmens bis zum oberen Rand des Bildes. Die Einfärbung geschieht auf der aktuellen Breite des Rahmens
c	Rahmengröße 4 x 4 Pixel einstellen
v	Rahmengröße 10 x 10 Pixel einstellen
b	Rahmengröße 50 x 50 Pixel einstellen
n	Rahmengröße 100 x 100 Pixel einstellen
m	Rahmengröße 200 x 200 Pixel einstellen
0	speichern der Rot-, Grün- und Blauwerte der Pixel innerhalb eines Rahmens der Kantenlänge 21 x 24 Pixel
—	speichern der Rot-, Grün- und Blauwerte der Pixel, die auf der aktuellen X-Position von unten bis zum oberen Rand des Bildes liegen
‘, , ‘, ‘-	Rahmengeschwindigkeit einstellen
G	durchschnittlichen Helligkeitswert im einzufärbenden Bild berechnen, um die Lookup-Table- Verschiebung zu berechnen
x	aktuelles Bild speichern
g	durchschnittlichen Helligkeitswert im einzufärbenden Bild innerhalb des aktuellen Rahmens berechnen, um die Lookup-Table- Verschiebung zu berechnen

## 10.2 Programm 'Objekt extrahieren'

Zu den bereits beschriebenen Funktionen kommen die folgenden hinzu. Lediglich die Funktionen der Taste 'u' ist nicht mehr vorhanden.

Taste	Funktion
I, O	wählen, ob das Programm innerhalb der erkannten Kanten kolorieren soll, oder außerhalb. Dadurch kann entschieden werden, ob das erkannte Objekt oder der Hintergrund eingefärbt werden soll
S	die erkannten Kanten mit dem eingestellten Helligkeitswert speichern
D	Bild innerhalb beziehungsweise außerhalb der erkannten Kanten einfärben
+, *	Helligkeitswert einstellen, ab dem Kanten gespeichert werden

## 10.3 Programm 'Lichtverlauf rekonstruieren'

In diesem Programm stehen die gleichen Funktionen wie in dem Programm 'automatische LT-Verschiebung' zur Verfügung.

Taste	Funktion
L	Licht-/ Farverläufe auf der aktuellen X-Position vom unteren bis zum oberen Rand des Bildes berechnen.
p	die Lookup-Table mit den berechneten Werten befüllen
P	Lookup-Table wie in dem Programm 'automatische LT-Verschiebung' befüllen
+, *	Helligkeitswert einstellen, ab dem Kanten gespeichert werden

## 11 Literaturverzeichnis

Solveig Grothe: Plötzlich ist die Welt ein bisschen bunter, <http://www.spiegel.de/einestages/nachkolorierte-schwarzweiss-fotos-eine-neue-dimension-a-1098796.html>, letzter Zugriff: 04.01.2018, (**Internetseite**)

Wikipedia: Schwarzweißfotografie, <https://de.wikipedia.org/wiki/Schwarzweißfotografie>, letzter Zugriff: 04.01.2018, (**Internetseite**)

Adrian Rosebrock: Super fast color transfer between images, <https://www.pyimagesearch.com/2014/06/30/super-fast-color-transfer-images/>, letzter Zugriff: 04.06.2018, (**Internetseite**)

Bettermarks: Eigenschaften von Exponentialfunktionen, <https://de.bettermarks.com/math/eigenschaften-von-exponentialfunktionen/>, letzter Zugriff: 02.06.2018, (**Internetseite**)

Prof. Dr. Aris Christidis: Bildauswertung und -bearbeitung, WS 2017/18, letzter Zugriff: 04.01.2018, (**Vorlesungsfolien**)

Ao. Univ. -Prof. Dr. Andreas Uhl: Grundlagen der Bildverarbeitung, WS 2005/2006, <https://www.cosy.sbg.ac.at/~uhl/imgProcess.pdf>, letzter Zugriff: 04.06.2018, (**Vorlesungsskript**)