



Fachhochschule Köln
University of Applied Sciences Cologne

07 Fakultät für Informations-, Medien-, und Elektrotechnik
Studiengang Photoingenieurwesen und Medientechnik

Diplomarbeit

Untersuchung eines neuen Pixelvergleichsmaßes zur
Optimierung eines bestehenden
Image-Mosaicing-Verfahrens endoskopischer
Aufnahmen

Sangit Bela Gupta

Köln im November 2008



Fachhochschule Köln
University of Applied Sciences Cologne

Department of Imaging Sciences and Media Technology

Thesis

Subject: Evaluation of a newly developed metric
of pixel-similarity for optimization of
a medical image mosaicing process

Author: Sangit Bela Gupta

Matr.-Nr: 11040640

Referent: Prof. Dr.-Ing. D. Kunz

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. W. Konen

Abgabedatum: 14. November 2008

Hiermit versichere ich, dass ich die Diplomarbeit selbständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen und bei Zitaten kenntlich gemachten Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Sangit Bela Gupta

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit untersucht ein neu entwickeltes Pixelvergleichsmaß zur Verbesserung einer in der Entwicklung befindlichen Image-Mosaicing-Software für endoskopische Aufnahmen. Aus den Farbinformationen der Bilder wird ein Vektor gewonnen, der auf dem Verhältnis seiner Farbwerte und dem Verhältnis seiner Helligkeit in Relation zur Umgebungshelligkeit beruht. Dadurch soll dem bei der Endoskopie oftmals auftretenden Beleuchtungsproblem effektiv begegnet werden. In mehreren Tests wird das RGB-Maß mit der bisher angewandten reinen Grauwertverarbeitung verglichen. Hierbei zeigen sich deutliche Vorteile. Insbesondere können Pixel in konsekutiven Frames auch bei stark variiertes Beleuchtung wieder aufgefunden werden.

Abstract

This thesis evaluates how far a newly developed pixel-metric can improve an image-mosaicing-software for endoscopic sequences. For this purpose, the rgb-information is transformed into a three-component vector, holding the ratios of the color channels as well as the pixel's brightness relating to local brightness. This approach should solve the problem of lighting changes which occurs in endoscopic images regularly. Several tests are performed, comparing the new metric to processing of gray values. Distinct advantages of the rgb-metric can be shown, especially when comparing images of strongly differing local brightness.

Inhaltsverzeichnis

1	Der fachliche Rahmen	1
1.1	Einordnung der Arbeit	1
1.2	Ziel der Arbeit	2
1.3	Aufbau der Arbeit	3
2	Prinzipien des Image Mosaicings	4
2.1	Das Verfahren nach Kouroggi	5
2.2	Das Tool von Naderi	7
2.2.1	Funktionsweise	8
2.2.2	Erweiterungspotential	8
3	Ein neuer Ansatz	11
3.1	Pixelvergleich auf RGB-Basis	12
3.1.1	Glättung	14
3.1.2	Normen	15
3.2	Erwartete Vorteile	16
4	Tests und Ergebnisse	18
4.1	Verwendete Test-Plugins	19
4.1.1	Plugin RowColumn	20
4.1.2	Plugin Area	21

4.2	Erste Einschätzung	22
4.3	Prüfung der Arbeitshypothesen	27
4.4	Wahl der Parameter	29
4.4.1	Der Einfluss des Offsets	30
4.4.2	Der Einfluss der Glättung	32
4.4.3	Wahl der Norm	35
4.5	Angleichung der Differenzwerte	36
4.6	Vergleich der Maße	38
4.6.1	Vergleiche mit geringem Abstand	39
4.6.2	Vergleiche bei größerem Abstand	46
4.6.3	Vergleiche bei starken Beleuchtungsunterschieden	50
4.6.4	Vergleich unspezifischer Pixel	56
4.7	Das verwendete Videomaterial	58
5	Auswertung	60
6	Fazit und Ausblick	63
	Literaturverzeichnis	66

Kapitel 1

Der fachliche Rahmen

Die Medizintechnik ist heute allgemein ein Wachstumsfeld¹. Durch moderne Techniken wird die Arbeit des Operateurs erleichtert und zugleich dessen Effektivität gesteigert.

1.1 Einordnung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des Forschungsprojektes „Bildverarbeitung und 3D-Navigation in der Endoskopie“². Das Projekt wurde 1998 von Prof. Dr. Konen (FH Köln) und PD Dr. Martin Scholz (Ruhr-Universität Bochum) ins Leben gerufen. Es umfasst die Entwicklung einer Reihe von softwarebasierten Verfahren, die speziell auf den Einsatz bei minimalinvasiven Eingriffen, wie z.B. in der Neurochirurgie, zugeschnitten sind. So wurde mit dem VN-System[KST98] bereits eine Möglichkeit geschaffen, dem Chirurgen bei endoskopischen Eingriffen stets die Position seiner Werkzeuge zu übermitteln. Im Falle einer

¹die Zeit 03.06.2004 Nr.24

²<http://www.gm.fh-koeln.de/~konen/Diplom+Projekte/FProjekt-BV-3D-Endo.htm>

plötzlich auftretenden Blutung (red-out) können die im Vorfeld aus den Bildern einer Endoskopkamera errechneten 3D-Koordinaten des Endoskops abgerufen werden.

Eine weitere Entwicklung und sinnvolle Ergänzung hierzu ist die vollautomatische Erstellung von Übersichtsbildern bzw. Image-Mosaiken. Da das Sichtfeld des Operateurs beim Blick durch das Endoskop stark begrenzt ist (sog. Scheuklappeneffekt), ist es wünschenswert, aus dem Stream der endoskopischen Bilder ein Panorama zu erzeugen. Damit ist auch die unmittelbare Umgebung des zu diesem Zeitpunkt vom Sensor der Endoskopkamera erfassten Bereichs sichtbar; eine bessere Orientierung wird somit gewährleistet.

Es liegen hierzu bereits eine Implementierung in Matlab und als ImageJ-Plugin [Nad07] vor.

1.2 Ziel der Arbeit

Diese Arbeit ist eine Weiterführung des von Naderi entwickelten Image-Mosaicing-Tools *Real Mosaic*. Sein als ImageJ-Plugin realisiertes Werkzeug basiert auf einem von Kouroggi et al. entwickelten Matching-Verfahren [KKHM99]. Im Gegensatz zu sogenannten feature-basierten Verfahren handelt es sich hierbei um ein intensitätsbasiertes Verfahren. Beim Matching gilt es ein Optimierungsproblem zu lösen. Ziel ist es, genau die Abbildung zu finden, die den Überlappungsbereich zweier konsekutiver Frames bestmöglich zur Deckung bringt. Der Vorgang wird als Registrierung bezeichnet³.

³Bei der Berechnung von Übersichtsbildern bezeichnen die Begriffe *Matching* oder *Registrierung* den Vorgang des Findens der nötigen Parameter. Das eigentliche Zusammenfügen wird in der Regel *Mosaicing* oder *Stitching* genannt. Die Begrifflichkeiten werden im Folgenden ebenfalls in diesem Sinn verwendet.

Die Anwendung *Real Mosaic* nutzt bislang Grauwerte zur Berechnung der für das Mosaicing nötigen Parameter. Diese Vorgehensweise soll nun um die Einbeziehung der RGB-Werte erweitert werden. Desweiteren, soll das Problem der Beleuchtung in endoskopischen Aufnahmen gelöst werden. Es wird also untersucht werden, inwiefern das Verwenden der Farbinformationen tatsächlich zu verbesserten Ergebnissen führen kann.

1.3 Aufbau der Arbeit

Zunächst folgt in Kapitel 2 eine Übersicht, in der die bisherige Vorgehensweise beim automatischen Erstellen der Panoramen allgemein vorgestellt wird. In Kapitel 3 wird ein neu entwickelter Ansatz zum Vergleich zweier Pixel beschrieben. Dieser ist Untersuchungsgegenstand der vorliegenden Arbeit. Das darauffolgende Kapitel 4 umfasst eine kurze Erklärung der verwendeten Test-Plugins und eine Darstellung der Tests, in denen das neue Pixelvergleichsmaß untersucht wird. In Kapitel 5 werden die Ergebnisse der durchgeführten Tests und Vergleiche des Maßes mit einer einfachen Grauwertnorm dargelegt. Abschließend fasst Kapitel 6 die Erkenntnisse zusammen und liefert einen Ausblick auf die weiteren Entwicklungen im Zusammenhang mit dieser Arbeit.

Kapitel 2

Prinzipien des Image Mosaicings

Aufgrund seiner vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten ist der Bereich des Image-Mosaicings bereits seit längerem Gegenstand der Forschung. Dementsprechend liegen bereits eine Reihe von Veröffentlichungen zu dem Thema vor (u.a. [Sze94], [LDH03]). Für die Verwendung im Bereich der medizinischen Endoskopie ist dabei die Echtzeitfähigkeit eines Algorithmus' ein entscheidendes Kriterium. Die von Kourogı et al. [KKHM99] entwickelte Methode wurde bereits in [KBS07] eingehend im Hinblick auf ihre Robustheit untersucht. Sie ist auch die Grundlage für die in Java implementierte, echtzeitfähige Anwendung von Naderi. Da die vorliegende Arbeit an diese Untersuchungen anschließt, soll also an dieser Stelle speziell das Matching-Verfahren nach [KKHM99] beschrieben werden. In diesem Zusammenhang wird auch gezeigt werden, an welchem Punkt die vorliegende Arbeit ansetzt.

2.1 Das Verfahren nach Kouroggi

Das Ziel der Methode von Kouroggi [KKHM99] ist die Errechnung des Verschiebungsvektorfeldes für das Matching. Zur Bestimmung der Verschiebungsparameter berechnet Kouroggi zunächst sogenannte Pseudo-Motion-Vektoren an allen ausgewählten Bildpunkten. Diese Vektoren stellen grobe Schätzungen des optischen Flusses¹ am jeweiligen Bildpunkt dar. Kouroggi benutzt dazu den räumlich-zeitlichen Gradienten der Helligkeit am entsprechenden Pixelort. Mit der Helligkeit $I(x, y, t)$ am Punkt (x, y) ist damit der Pseudo-Motion-Vektor (u_p, v_p) über folgende Gleichungen definiert:

$$u_p = -\frac{\partial I}{\partial t} / \frac{\partial I}{\partial x}, \quad v_p = -\frac{\partial I}{\partial t} / \frac{\partial I}{\partial y} \quad (2.1)$$

Wenn der tatsächliche Bewegungsvektor am Punkt x, y sehr klein ist, so gilt die Gleichung $\frac{\partial I}{\partial x}u + \frac{\partial I}{\partial y}v + \frac{\partial I}{\partial t} = 0$. Damit lässt sich der Pseudo-Motion-Vektor wie folgt schreiben:

$$u_p = -\frac{\partial I}{\partial t} / \frac{\partial I}{\partial x} = u + \left(\frac{\partial I}{\partial y} / \frac{\partial I}{\partial x} \right) v, \quad (2.2)$$

$$v_p = -\frac{\partial I}{\partial t} / \frac{\partial I}{\partial y} = v + \left(\frac{\partial I}{\partial x} / \frac{\partial I}{\partial y} \right) u. \quad (2.3)$$

Bei der Betrachtung diskreter Bildfolgen verwendet Kouroggi die folgenden Gleichungen, um die horizontalen, vertikalen und zeitlichen Gradienten der Helligkeit zu bestimmen. Mit $I_r(x, y)$ und $I_c(x, y)$ als der Helligkeit des Referenz- bzw. des aktuellen Frames an der Stelle (x, y) :

$$\frac{\partial I}{\partial x} = (I_r(x + \delta x, y) - I_r(x - \delta x, y)) / 2\delta x, \quad (2.4)$$

¹s. hierzu bspw. [Jäh02] S.405 ff.

$$\frac{\partial I}{\partial y} = (I_r(x, y + \delta y) - I_r(x, y - \delta y)) / 2\delta y, \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial I}{\partial t} = I_c(x, y) - I_r(x, y), \quad (2.6)$$

wobei hier δx und δy jeweils Schrittweiten in beiden Dimensionen eines Bildes darstellen. Die gefundenen Vektoren (u_p, v_p) werden durch einen Pixel-zu-Pixel-Vergleich auf ihre Tauglichkeit für die weiteren Berechnungen überprüft. Dazu wird folgender Test angesetzt:

$$|I_c(x + u_p, y + v_p) - I_r(x, y)| < T \quad (2.7)$$

T gibt hierbei eine beliebige Grauwertschwelle an. Diese muss so gewählt werden, dass der wahre Bewegungsvektor den Test bestehen würde. Kouroggi schlägt den empirisch ermittelten Wert 5 vor.

Aus den Vektoren, die die Testbedingung erfüllen, werden die affinen Bewegungsparameter geschätzt. Hierbei können allerdings nur Bewegungen von etwa einem Pixel geschätzt werden. Größere Verschiebungen können vom lokalen Gradienten nicht erkannt werden. Um diese Einschränkung zu umgehen, kommt an dieser Stelle das Verfahren der sog. *Compensated Motion* zum Einsatz. Die Methode benötigt eine grobe Schätzung des Verschiebungsvektors (u_c, v_c) . Wird nun die Differenz (u_r, v_r) zum tatsächlichen Vektor (u, v) berechnet, muss nur noch eine kürzere Strecke geschätzt werden. Auch die neuen Vektoren werden auf die Bedingung aus Gleichung (2.7) geprüft.

Um die grobe Schätzung für die Verschiebungsvektoren zu erhalten, setzt Kouroggi voraus, dass es sich bei allen Transformationen um affine Abbildungen handelt. Um weiterhin den hohen Rechenaufwand für die *compensated motion* zu begrenzen, wird folgende Strategie angewendet. Unter der Annahme, (a_1, a_2, \dots, a_6) sei das Ergebnis für die vorherige Schätzung

der affinen Parameter, berechnet Kourogı einen Vektor (u_c, v_c) für die *compensated motion* an jedem Punkt (x, y) über

$$u_c = a_1x + a_2y + a_3,$$

$$v_c = a_4x + a_5y + a_6.$$

Mit der partiellen Ableitung der Helligkeit nach der Zeit als

$$\frac{\partial I}{\partial t} = I_c(x + u_c, y + v_c) - I_r(x, y) \quad (2.8)$$

berechnet sich dann der Pseudo Motion Vektor als

$$u_p = -\frac{\partial I}{\partial t} / \frac{\partial I}{\partial x} + u_c, v_p = -\frac{\partial I}{\partial t} / \frac{\partial I}{\partial y} + v_c. \quad (2.9)$$

Die Berechnung und Auswahl der Pseudo Motion Vektoren und der globalen Bewegungsparameter wird solange wiederholt, bis der durchschnittliche Fehler des Pixel-zu-Pixel Matchings unter eine festgelegte Schwelle sinkt oder eine bestimmte Anzahl von Durchläufen erreicht ist.

2.2 Das Tool von Naderi

Mit dem Mosaicing-Tool von Naderi wurde ein echtzeitfähiges Werkzeug geschaffen, das vollständig in Java implementiert ist. Dabei stand zunächst die Performance im Vordergrund. Die tatsächlichen Berechnungen wurden an exemplarischen Bildern durchgeführt. Inzwischen wurde es um eine erweiterte Benutzeroberfläche ergänzt und auch verschiedene Input- und Outputmöglichkeiten hinzugefügt [Zim08]. Im Kern beruht es nach wie vor auf der im Abschnitt 2.1 vorgestellten Methode nach Kourogı.

2.2.1 Funktionsweise

Mit dem ImageJ-Plugin *Real Mosaic*² lassen sich endoskopische Bildfolgen zu Übersichtsbildern zusammenfügen. Dazu können wahlweise Frames aus einem Live-Video-Stream errechnet oder bereits lokal gespeicherte Sequenzen verwendet werden. Die zu bearbeitenden Bilder müssen dabei im *Bitmap*-Format vorliegen. Die eingehenden Bilder werden immer paarweise gepuffert und bearbeitet. Enthalten sie RGB-Daten, so werden die farbigen Bilder vor der Bearbeitung kopiert und in einem separaten Farb-Stack abgelegt. Zur Durchführung der eigentlichen Berechnungen werden die Daten erst in 8-Bit Grauwertbilder umgewandelt. Dann wird das intensitätsbasierte Verfahren aus [KKHM99] bzw. [KBS07] angewendet, um die Registrierung durchzuführen. Erst für die Ausgabe des Panoramas wird dann wieder auf die RGB-Bilder zurückgegriffen. Diese werden dabei unter Verwendung der aus den Byte-Bildern gewonnenen Parameter zu einem Übersichtsbild zusammengefügt.

2.2.2 Erweiterungspotential

Der Zugang zum Operationsbereich erfolgt in der Neuroendoskopie monoportall. Das bedeutet, dass Kamera, Werkzeuge, Spülkanäle und auch die Lichtquelle im Endoskoprohr zusammengefügt sind. Die Beleuchtungsbedingungen sind aufgrund der damit verbundenen Einschränkungen nicht immer optimal. Hierbei sind zwei Punkte zu unterscheiden:

- das Auftreten von Glanzlichtern
- der Randlichtabfall

Glanzlichter entstehen aufgrund der Materialbeschaffenheit in Verbindung mit einer stark gebündelten Beleuchtung. Da die Lichtquelle

²[Nad07], [Zim08]

(Xenon- oder Halogenlampe) im Endoskop integriert ist, stimmen also Blickrichtung der Kamera und Ausrichtung der Beleuchtung stets überein. Durch die frontale Beleuchtung der Szene in Verbindung mit der geringen Entfernung zwischen Kamera und Gewebe, kommt es zu teilweise starken Reflexionen an der feuchten Oberfläche. Diese Reflexionen machen sich bei Bewegung der Kamera, wie z.B. Kameraschwenks, als wandernde Glanzlichter bemerkbar und können das Matching erschweren. Neben dem Auftreten von Glanzlichtern stellt auch die Randabschattung bei endoskopischen Bildern ein Problem dar. Für dieses Phänomen gibt es verschiedene Ursachen [Mar87]:

- Künstliche Vignettierung: Auf die Ränder des Sensors fällt weniger oder sogar kein Licht. Der Effekt wird verstärkt durch die Länge des Endoskoprohrs³.
- Die Beleuchtung: Die Szene ist ungleichmäßig ausgeleuchtet; der Lichtkegel deckt nicht die gesamte sichtbare Fläche ab.
- Den natürlichen Randlichtabfall: Die Randstrahlen fallen schräg auf die Bildebene (Sensor) und transportieren einen geringeren Lichtstrom (\cos^4 -Gesetz). Da in der Endoskopie aus praktischen Gründen ausschließlich Objektive mit kurzer Brennweite eingesetzt werden, tritt der Effekt besonders stark auf.

Diese Phänomene führen dazu, dass die lokale Helligkeit innerhalb einer Szene bei Bewegung der Kamera stark variieren kann. Somit ist ein Pixel, das nur über seine absolute Helligkeit beschrieben wird, u.U. in konsekutiven Frames weniger gut auffindbar.

Diese Aspekte - ebenso wie die der Farbverarbeitung - konnten bisher

³I.d.R. befindet sich der Sensor am Ende des Endoskops. Inzwischen gibt es aber auch andere Bauformen, s. dazu Abschnitt 4.7.

in *Real Mosaic* noch nicht berücksichtigt werden. Der Algorithmus ist zwar bereits in der Lage, farbige Übersichtsbilder auszugeben. Allerdings werden zur Berechnung der nötigen Parameter farbige Eingangsbilder zunächst in 8-Bit-Grauwertbilder umgerechnet⁴. Ein Pixel kann danach also 256 unterschiedliche Helligkeitsstufen aufweisen. Bei RGB-Bildern mit 8 Bit pro Kanal sind theoretisch ca. 16,7 Millionen Stufen möglich. Eine rein optische Beurteilung sowie eine Begutachtung der Farbhistogramme von endoskopischem Bildmaterial zeigen zwar klar, dass diese Bandbreite nicht ausgeschöpft wird. Trotzdem enthalten RGB-Bilder unzweifelhaft ein weitaus höheres Maß an Informationen⁵.

Desweiteren führt eine Variation der Beleuchtung zugleich zu veränderten Intensitätswerten für jedes Pixel. Die im Bild enthaltene Information wird in diesem Fall also maßgeblich durch die Beleuchtung beeinflusst. Für Grauwertbilder ist die Helligkeit die einzige Größe um ein Pixel zu beschreiben. Der Schluss liegt also nahe, auf das Mehr an Informationen, wie sie RGB-Daten liefern, zurückzugreifen. Das darin begründete Verbesserungspotential wurde jedoch bisher noch nicht untersucht oder genutzt. Hier setzt nun die vorliegende Arbeit an.

⁴In ImageJ geschieht dies standardmäßig nach der Methode $I = (R + G + B)/3$.

⁵Die hier untersuchten endoskopischen Bilder umfassten im Mittel ca. 160.000 Farben. Der Wert wurde mit einer Methode nach [BB06] aus exemplarischen Bildern ermittelt.

Kapitel 3

Ein neuer Ansatz

In Kapitel 2.2.2 wurde die These behandelt, dass es beim Erstellen von Bildmosaiken kritisch ist, wenn ein Pixel nur über seine Helligkeit beschrieben wird. Beim Vergleich zweier Pixel kann sich dies als unzulänglich herausstellen. Ein entscheidendes Element¹ der Mosaicing-Methode nach Kourogı ist die Bedingungsgleichung², bei der Pixeldifferenzen überprüft werden:

$$|I_c(x + u_p, y + v_p) - I_r(x, y)| < T.$$

Ausgehend davon brauchen weitere Berechnungen nur auf Pixeln durchgeführt zu werden, deren Verwendung sich für das Verfahren als sinnvoll erwiesen hat. Für die Verlässlichkeit der Panoramabildung ist es also ein wichtiges Kriterium, hier eine möglichst hohe Genauigkeit zu erzielen. Entsprechend soll in diesem Kapitel detailliert auf einen neuen Ansatz zum Vergleich der Ähnlichkeit zweier Pixel eingegangen werden. Die Idee dazu wurde von Herrn Prof. Dr. Kunz von der Fachhochschule Köln entwickelt.

¹vgl. [KBS07], S.4

²Gleichung (2.7), s. Kapitel 2

3.1 Pixelvergleich auf RGB-Basis

Im Folgenden werden nun die theoretischen Überlegungen zum untersuchten Pixelvergleichsmaß dargelegt. Zunächst soll das Konzept des Maßes vorgestellt werden.

Es beruht auf folgenden Überlegungen:

- Ändert sich die Beleuchtung in einer Szene, so ändern sich zwar die RGB-Werte. Farbton und Sättigung bleiben allerdings erhalten. Die Beleuchtung wirkt multiplikativ.
- Die Beleuchtung ändert sich nur langsam im Ort.

Ziel ist es jetzt, diese Zusammenhänge zu nutzen, um ein Pixel möglichst eindeutig zu beschreiben. Die Beschreibung soll dabei möglichst robust gegenüber veränderten Beleuchtungsverhältnissen sein. Bei dem neuen Pixelvergleichsmaß wird daher jedes RGB-Tripel in einen neuen Vektor mit drei Komponenten überführt. Dabei repräsentieren die einzelnen Komponenten jeweils zueinander in Verhältnis gesetzte Kombinationen der Farbkanäle. Die Werte werden zunächst logarithmiert, um die Gammavorverzerrung der Kamera auszugleichen³. Der neue Vektor setzt sich dabei wie folgt zusammen:

$$\vec{C} = (C_1, C_2, C_3) = (I_{log} - I_{quer}, B_{log} - G_{log}, R_{log} - G_{log}) \quad (3.1)$$

Die Größe I_{log} enthält dabei die Summe der logarithmierten Werte von R , G und B , es gilt:

$$I_{log} = R_{log} + G_{log} + B_{log} \quad (3.2)$$

³s. hierzu [BB06] S.76

I_{log} ist somit ein Maß für die Helligkeit eines Bildpunktes. I_{quer} erhält man durch eine Tiefpassfilterung, d.h. Glättung, von I_{log} (s. Abschnitt 3.1.1). Folglich stellt die Größe I_{quer} einen Mittelwert der lokalen Helligkeit dar. Die erste Komponente des Vektors \vec{C} setzt dadurch die Helligkeit eines Pixels ins Verhältnis zur Helligkeit in seiner Umgebung. Auf vergleichbare Weise beschreiben die beiden übrigen Komponenten für ein Pixel die Verhältnisse der Farbkanäle zueinander.

Eine Beleuchtungsveränderung lässt sich ausdrücken als Multiplikation aller Farbkanäle mit einem konstanten Faktor c . Dieser kürzt sich im neuen Vektor nun gerade wieder heraus. Mit $\log(g) - \log(h) = \log\left(\frac{g}{h}\right)$ gilt für die Komponenten $B_{log} - G_{log}$ und $R_{log} - G_{log}$:

$$\log\left(\frac{cB}{cG}\right) = \log\left(\frac{B}{G}\right) \quad (3.3)$$

bzw.

$$\log\left(\frac{cR}{cG}\right) = \log\left(\frac{R}{G}\right). \quad (3.4)$$

Auch für die Mittelwertbildung bedeutet eine Multiplikation der eingehenden Werte mit einer Konstante eine Erhöhung des Mittelwerts um eben diesen Wert. Demnach sollte auch die Komponente $I_{log} - I_{quer}$ analog zu den Gleichungen 3.3 und 3.4 von einer veränderten Beleuchtung unberührt bleiben. Durch diese Betrachtungsweise ergibt sich nun für den Vergleich zweier RGB-Tripel eine grundsätzlich andere Ausgangslage als beim reinen Vergleich zweier Grauwerte.

Aufgrund der technischen und räumlichen Einschränkungen kann bei neuroendoskopischen Aufnahmen keine optimale Ausleuchtung der Szenen erfolgen. Infolge von ungünstigen Beleuchtungssituationen können also Pixelintensitäten von Bild zu Bild stark variieren. Bei der Verarbeitung von Grauwerten steht nur die Größe Intensität $I(x, y)$ zur Beschreibung

eines Pixels zur Verfügung. Soll bei der Registrierung eines Bildpaares für ein Pixel aus einem Bild $B(t)$ dessen Entsprechung in einem Bild $B(t+1)$ gefunden werden und werden mögliche Kandidaten nur nach der jeweiligen Grauwertdifferenz ΔI beurteilt, so kann dies eine Zuordnung mitunter deutlich erschweren.

Durch die Farbverarbeitung kann sich hier also durchaus ein Vorteil ergeben. Bei endoskopischen Aufnahmen gibt es nur eine Lichtquelle. Es erfolgen keine Schnitte bzw. plötzliche Szenenwechsel, und die im Bild enthaltene Bewegung rührt hauptsächlich von der von Hand geführten Kamera. Die Beleuchtungssituation ist also nur von der beobachteten Szene abhängig. Das Reflexionsverhalten ändert sich mit der Bewegung und die lokale Helligkeit ändert sich tatsächlich nur langsam von Bild zu Bild.

3.1.1 Glättung

Um ein Bildelement in seinen lokalen Zusammenhang einordnen zu können, wird beim hier beschriebenen Vorgehen seine Helligkeit in Bezug zur Umgebungshelligkeit gesetzt. Benötigt wird dazu ein mittlerer Wert für die lokale Helligkeit. Zur Glättung des Werts für die Helligkeit (I_{log}) kommt ein Infinite Impulse Response (IIR) Tiefpass zum Einsatz. Hiermit lässt sich eine relativ starke Filterung mit nur geringem Rechenaufwand erzielen. Da es sich um ein rekursives Filter handelt, wirken sich alle Bildelemente auf das Filterergebnis aus. Bei der Tiefpassfilterung wurde demgemäß besonderes Augenmerk auf die Behandlung der Bildränder gerichtet. Hier stellt sich ein allgemeines Problem. Es tritt bei jeglicher Filterung auf, sobald die Filterregion so positioniert ist, dass zumindest einer der Filterkoeffizienten außerhalb des Bildbereichs zu liegen kommt und damit kein zugehöriges Bildpixel hat [BB06]. Dies war hier

insbesondere der Fall, weil mit maskierten Bildern⁴ gearbeitet wurde. Die Maskenpixel mussten dabei von der Berechnung ausgeschlossen werden, da sie sonst das gesamte Ergebnis verfälscht hätten. Vor allem, da hier ein rekursives Filter zum Einsatz kam. Zur Behandlung der Bildränder existieren einige gängige Vorgehensweisen:

- Ersetzen der Filterwerte im Randbereich durch eine Konstante.
- Beibehaltung der ursprünglichen Pixelwerte.
- Berechnung der Filterwerte im Randbereich unter der Prämisse, dass
 - die außerhalb liegenden Pixel einen konstanten Wert haben.
 - sich die Randpixel nach außen hin fortsetzen.
 - sich das gesamte Bild in beiden Dimensionen kachelartig fortsetzt.

Im vorliegenden Fall wurde zur Lösung des Problems eine Maskenabfrage durchgeführt. Zu diesem Zweck wurden im Vorfeld für alle verwendeten Sequenzen entsprechende Binärbilder erstellt. Unmaskierten Pixeln wurde darin der Wert 1 zugewiesen, maskierten Bildpunkten der Wert 0. Bei der Berechnung der Filterwerte wurden dann nur die mit 1 referenzierten Bildelemente verwendet. Das bedeutet im Ergebnis, dass die Pixel entlang des Maskenrandes nicht prozessiert werden.

3.1.2 Normen

Zur objektiven Bewertung der Unterschiede zweier Pixel sind im Rahmen diese Arbeit zwei verschiedene Vergleichsmaße vorgesehen. Beiden

⁴Endoskopbilder weisen i.d.R. eine kreisrunde Maske auf.

werden zunächst die gemäß den Formeln aus Abschnitt 3.1 berechneten Werte übergeben. Dann bilden beide für zwei Pixel die Differenzen komponentenweise und addieren diese auf. Das Ergebnis ist ein positiver Wert, der mit größerer Differenz steigt.

3.1.2.1 Summe der absoluten Differenzen

Die Summe der absoluten Differenzen (SAD; engl.: sum of absolute differences) wird häufig auch als Verzerrungsmaß im Rahmen der Bilddatenkomprimierung verwendet [Str05]. Für zwei Vektoren $\vec{u} = (u_1, u_2, u_3)$ und $\vec{v} = (v_1, v_2, v_3)$ berechnet sich die Summe der absoluten Differenzen als

$$s(\vec{u}, \vec{v}) = \left\| \vec{u} - \vec{v} \right\|_1.$$

3.1.2.2 Euklidische Norm

Alternativ wurde die Euklidische Norm verwendet. Dabei handelt es sich um die Wurzel aus der Summe der Differenzquadrate. Für zwei Vektoren $\vec{u} = (u_1, u_2, u_3)$ und $\vec{v} = (v_1, v_2, v_3)$ gilt hier:

$$e(\vec{u}, \vec{v}) = \left\| \vec{u} - \vec{v} \right\|_2$$

Zu beachten ist hierbei, dass wegen der Quadrierung große Differenzen stärker gewichtet werden als kleine Differenzen.

3.2 Erwartete Vorteile

Durch die Nutzung der RGB-Informationen, insbesondere auf die hier beschriebene Weise, sollte im Ergebnis ein Pixel innerhalb einer Bildfolge besser identifizierbar sein. Vor allem sollte das neue Maß relativ robust

gegenüber Beleuchtungsvariationen sein, da ein Pixel nun nicht mehr nur über seinen Intensitätswert beschrieben wird, sondern stattdessen über Größenverhältnisse, die sich bei moderater Beleuchtungsänderung über die Zeit von Bild zu Bild nur wenig verändern sollten. Dies ist für alle drei Komponenten zu erwarten. Eine genaue Untersuchung muss nun folgen.

Kapitel 4

Tests und Ergebnisse

Zur Beurteilung des vorgestellten Maßes im Hinblick auf die erwarteten Eigenschaften und zum Vergleich mit der reinen Grauwertbeurteilung wurde eine Reihe von Tests durchgeführt. Diese sollen hier, zusammen mit einer Darstellung der Ergebnisse, beschrieben werden. Da bisher keine Anhaltspunkte darüber vorliegen, wie sich die Wirksamkeit des Maßes in Zahlen ausdrückt, soll darüber zunächst eine Einschätzung gewonnen werden. Dabei werden im Folgenden allgemeinere Tests durchgeführt. Als erstes soll eine Aufstellung zeigen, welche Minimal- und Maximalwerte für die Pixeldifferenzen zu erwarten sind. Auch wie diese mit den jeweiligen Grauwertdifferenzen korrespondieren, ist Teil der Darstellung. In einem weiteren Schritt soll anhand von verschiedenen Variationen der Testbedingungen eine differenzierte Einsicht gewonnen werden. Zu diesem Zweck werden die Einflüsse der Testparameter, des verwendeten Bildmaterials und der beobachteten Bildregionen untersucht.

Für die Durchführung der Tests wurden zwei ImageJ-Plugins verwendet, die zu diesem Zweck im Rahmen dieser Arbeit erstellt wurden. Ihre Funktionsweise wird im folgenden kurz dargestellt, bevor sich dann die

Beschreibung der Tests und Ergebnisse anschließt. Am Ende dieses Kapitels findet sich außerdem ein Abschnitt, in dem einige Probleme erläutert werden, die während der Tests zu Tage traten.

4.1 Verwendete Test-Plugins

Diese Arbeit untersucht einen bestimmten Aspekt der Verbesserungsmöglichkeit der Software *Real Mosaic*, mit der Panoramen von endoskopischen Aufnahmen erstellt werden können. Da die Software als ImageJ-Plugin realisiert wurde, sind auch die beiden hier zum Einsatz kommenden Testwerkzeuge in dieser Form umgesetzt. Beide Plugins berechnen jeweils für auswählbare Referenzpixel die Differenzen nach dem in Abschnitt 3.1 vorgestellten RGB-Maß und einer einfachen Grauwertnorm (Differenzbetrag der Grauwerte). Das Plugin *RowColumn* arbeitet mit einem Bild als Eingang und vergleicht das Referenzpixel mit seiner gesamten Spalte und Zeile, das Plugin *Area* arbeitet mit zwei Bildern als Eingang und vergleicht das Referenzpixel aus Bild 1 mit einer 21x21 Pixel großen Region um ein ebenfalls frei wählbares Pixel in Bild 2. Demgemäß ist beiden Plugins der Kern gemeinsam. Hier findet die Verarbeitung der RGB-Bilddaten statt. Für die Bildung der Grauwertdifferenz werden die RGB-Daten in 8 Bit-Daten umgewandelt, und die jeweiligen Pixeldifferenzen werden als deren Betrag ausgegeben.

Die Bildung der RGB-Differenzen hingegen erfolgt auf Grundlage der in Kapitel 3 vorgestellten Überlegungen und Ansätze. Einige Parameter können vom Benutzer vor Durchführung der Berechnungen festgelegt werden. Diese sind:

- der Offset für die Logarithmierung
- die Stärke des Tiefpassfilters

- die verwendete Norm

Da als erstes eine Logarithmierung der RGB-Werte durchgeführt wird, muss dabei eine Berechnung von $\log(0)$ verhindert werden¹. Hierzu lässt sich ein positiver Offset festlegen, der vor der Logarithmierung auf alle Werte addiert wird.

Die Stärke der Tiefpassfilterung wirkt sich maßgeblich auf die Komponente $I_{log} - I_{quer}$ aus. Sie gibt das Verhältnis der Helligkeit eines Bildpunktes zur lokalen Helligkeit an (s. Abschnitt 3.1).

4.1.1 Plugin RowColumn

Dem Plugin *RowColumn* muss ein RGB-Bild mit 24 Bit Farbtiefe (8 Bit pro Kanal) als Eingang übergeben werden. Nach Auswahl eines Bildpunktes als Referenz werden Grauwert- und RGB-Differenzen für die gesamte Zeile und Spalte als Graph ausgegeben (s. Abbildung 4.1). Natürlich lassen sich dementsprechend eher allgemeinere Aussagen über die Wirksamkeit der untersuchten Maße treffen. Dieses Plugin wurde daher für grundlegende Tests verwendet.

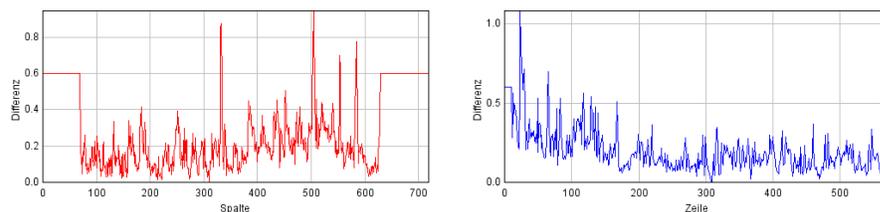


Abbildung 4.1: Beispiel für die Ausgabe von *RowColumn*

¹Die Logarithmierung wird mit der Java-Methode *Math.log()* durchgeführt. Diese berechnet den natürlichen Logarithmus ihres Arguments.

4.1.2 Plugin Area

Das Plugin *Area* arbeitet mit zwei RGB-Bildern als Eingang. Hier kann in jedem der Bilder ein Referenzpunkt festgelegt werden. Das Plugin berechnet die Pixeldifferenzen zwischen dem gewählten Punkt im ersten Bild und einem 21x21 Pixel großen Bereich um den gewählten Punkt im zweiten Bild. Dadurch wird der Umstand berücksichtigt, dass die Wahl eines korrespondierenden Bildpunktes per Mausklick nicht immer pixelgenau erfolgt. Ausgabe sind zwei Differenzbilder; je eins für RGB- und eins für Grauwert-Differenzen (s. Abbildung 4.2). Außerdem wird die Differenz der gewählten Pixel sowie die minimale Differenz für die gesamte betrachtete Region ausgegeben. Für das gefundene Minimum wird auch der Index (die Nummer des Feldes) in der Vergleichsregion angegeben, somit lässt sich einfach feststellen für welche Bildpunkte die Differenz minimal ist. Außerdem gibt das Plugin den Mittelwert und die Standardabweichung der ermittelten Differenzen aus. Da hier mit zwei Bildern gearbeitet wird, lassen sich genauere Aussagen über die Wiederauffindbarkeit eines Pixels in Bildfolgen machen.

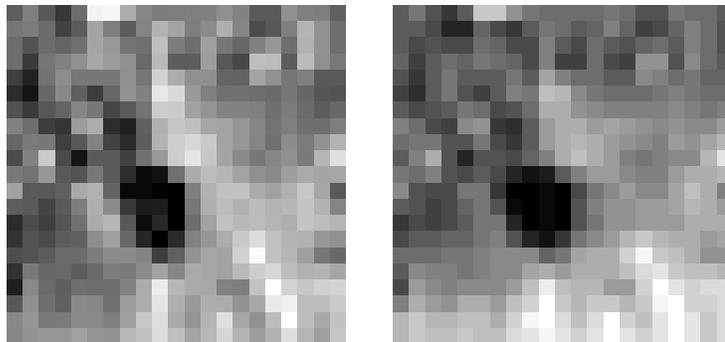


Abbildung 4.2: Beispiel für die Ausgabe von *Area*

4.2 Erste Einschätzung

Um die Größenordnung der Differenzwerte einschätzen zu können, die das neue Maß liefert, werden zu Beginn der Testreihen einige allgemeine Tests auf einzelnen endoskopischen Bildern durchgeführt. Dabei werden fünf Referenzpixel mit ihrer Zeile und ihrer Spalte verglichen. Das verwendete Plugin ist *RowColumn*, mit den Einstellungen *Offset* = 1, *Stärke des Tiefpassfilters* = 5 und *Norm* = SAD². Die Abbildungen 4.3, 4.4 und 4.5 zeigen die Testbilder mit markierter Lage der Referenzpixel für die jeweilige Messung und angedeuteter Zeile und Spalte.

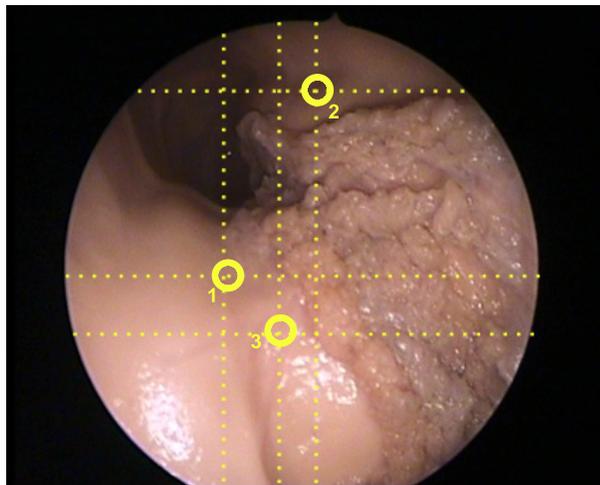


Abbildung 4.3: Testbild 1 mit markierten Referenzpixeln

ΔRGB_{min}	ΔRGB_{max}
0	4,096

Tabelle 4.1: Extremwerte für Delta RGB (absolut)

²Dies sind die Standardeinstellungen der Plugins. Sie werden für alle Tests verwendet, solange nichts anderes angegeben ist.

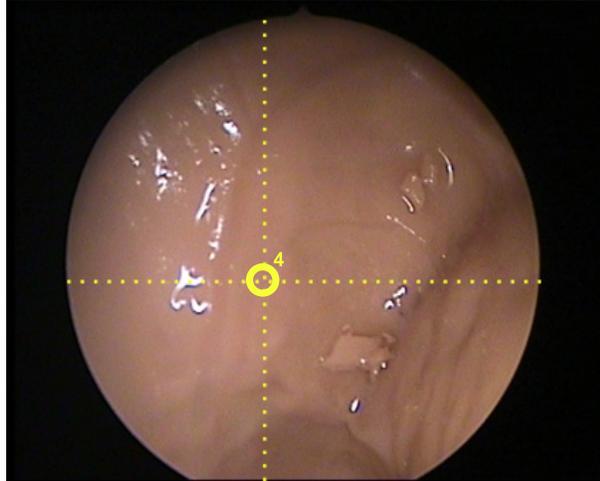


Abbildung 4.4: Testbild 2 mit markiertem Referenzpixel

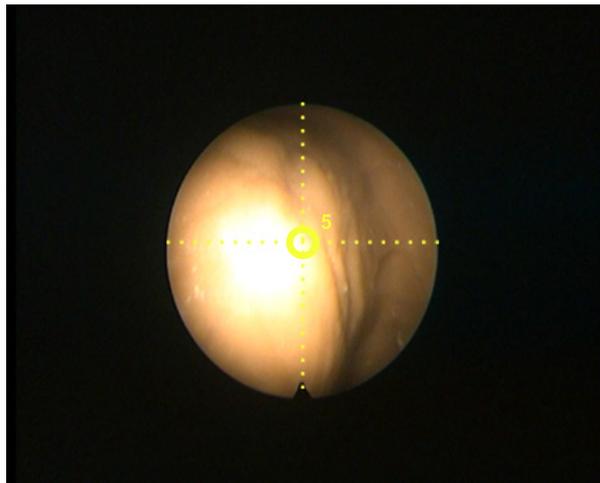


Abbildung 4.5: Testbild 3 mit markiertem Referenzpixel

ΔRGB_{min}	ΔRGB_{max}
0,011	1,327

Tabelle 4.2: Extremwerte für Delta RGB (gemittelt)

Die Tabellen 4.1 und 4.2 zeigen auf, welchen Bereich das neue Maß bei diesen Messungen abdeckte. Tabelle 4.1 zeigt die absoluten Extremwerte, die über alle Messungen angenommen wurden. Tabelle 4.2 zeigt die Extremwerte gemittelt über alle Messungen. Allgemein lässt sich sagen, dass die RGB-Differenzen, wie erwartet, deutlich differenziertere Ergebnisse liefern, als die reinen Grauwertdifferenzen. Dies soll Tabelle 4.3 beispielhaft veranschaulichen. Gezeigt sind die Grauwertdifferenzen (ΔGW), die Differenzen nach dem neuen Maß (ΔRGB), die Beiträge der einzelnen Komponenten³:

- ΔI für $I_{log} - I_{quer}$,
- ΔB für $B_{log} - G_{log}$,
- ΔR für $R_{log} - G_{log}$,

die RGB-Werte des Vergleichspixels und der jeweilige Ort der Messung. Dazu ist hier lediglich die x -Koordinate angegeben, da die in Tabelle 4.3 gezeigten Punkte alle in der selben Spalte liegen. In der ersten Zeile finden sich die Werte für das Referenzpixel. Von den Punkten mit $\Delta GW = 0,1,2,3,4$ wurden jeweils die ausgewählt, an denen ΔRGB minimal bzw. maximal wurde. Wie man sieht, deckt das neue Maß für die aufgeführten Grauwertdifferenzen einen relativ weiten Bereich ab. Hier zeigt sich also bereits eine Konsequenz aus der Verwendung der RGB-Daten. Das RGB-Maß erkennt große Unterschiede zwischen Punkten für die das Grauwertmaß denselben Differenzwert errechnet. Für die kleinsten ΔRGB wird in den meisten Fällen auch ΔGW klein. Es gibt allerdings einige Ausnahmen. Zu beachten sind auch die Stellen an denen ΔRGB seinen Maxi-

³Die Werte für die Komponenten sind auf drei Stellen nach dem Komma gerundet. Dadurch können sich Abweichungen von ihrer Summe und Delta RGB ergeben, das hier mit höherer Genauigkeit errechnet wurde.

Δ GW	Δ RGB	x	Δ I	Δ B	Δ R	RGB
0	0	266	0	0	0	174 127 106
0	0,004	265	0,004	0	0	174 127 106
0	0,275	549	0,199	0,064	0,012	179 129 101
1	0,009	270	0,005	0,001	0,002	175 128 107
1	0,303	541	0,282	0,009	0,011	176 127 107
2	0,026	221	0,01	0,012	0,004	176 129 109
2	0,302	539	0,267	0,02	0,015	178 128 109
3	0,03	219	0,004	0,012	0,014	177 131 108
3	0,252	354	0,137	0,016	0,098	180 119 101
4	0,034	163	0,01	0,007	0,016	178 132 111
4	0,331	392	0,228	0,083	0,021	175 127 106

Tabelle 4.3: Messung 1, Zeile

malwert annimmt. Hier wird auch eine große Grauwertdifferenz gemessen. Diese nimmt allerdings Werte zwischen 9 und 203 an, schwankt also deutlich. Wie sich die unterschiedliche Arbeitsweise der Maße beim Vergleich korrespondierender Pixel aus den Bildern einer Sequenz auswirkt, wird ausführlich in Abschnitt 4.6 beschrieben. Hier werden zunächst nur allgemeine Beobachtungen festgehalten.

Einen besonderen Fall zeigen die Abbildungen 4.6 und 4.7. Bei der Messung wurde vom Grauwertmaß an einer Stelle eine Differenz von lediglich 4 erkannt, obwohl sich die RGB-Werte der verglichenen Pixel deutlich unterscheiden. Bei der Umrechnung in Grauwerte wird diese Differenz jedoch aufgehoben, da sie für beide Bildpunkte in der Summe fast gleich sind. Vom neuen Maß wird die Unterschiedlichkeit hingegen klar erkannt,

und alle Komponenten, die in den Gesamtdifferenzwert eingehen nehmen hohe Werte an. Für das Grauwertmaß sinken die Spaltendifferenzwerte an dieser Stelle also sehr stark ab, wohingegen die RGB-Differenz sehr stark ansteigt. Bei dem genannten Fall handelt es sich zwar, wie bereits erwähnt, um einen Sonderfall, was sich aber allgemein daran erkennen lässt, ist die für beide Maße offensichtlich unterschiedliche Verwertung von Bildinformationen.

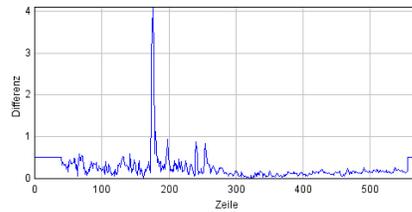


Abbildung 4.6: Plot der RGB-Differenzen aus Messung 1

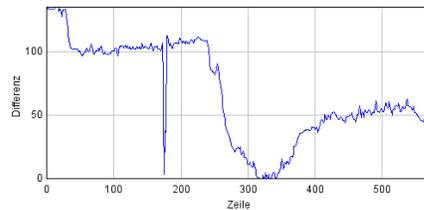


Abbildung 4.7: Plot der Grauwert-Differenzen aus Messung 1

Weiterhin lassen sich die einzelnen Komponenten des RGB-Maßes bereits nach ihrem Beitrag zur Gesamtdifferenz beurteilen. Es wird deutlich, dass $I_{log} - I_{quer}$ in einer überwiegenden Zahl der Fälle den größten Wert liefert. In den folgenden Tests sollen nun tiefere Einsichten in die Wirkungsweise des neuen Maßes unter verschiedenen Bedingungen gewonnen werden.

4.3 Prüfung der Arbeitshypothesen

Da sich nun eine Aussage darüber machen lässt, ob ein gemessener Differenzwert groß oder klein ist, soll in einem nächsten Schritt überprüft werden, inwiefern die theoretischen Überlegungen aus Abschnitt 3.1 in der Praxis zutreffen. Dazu werden zwei korrespondierende Pixel aus einem Bildpaar miteinander verglichen. Das Vergleichsbild ist dabei eine Kopie des Referenzbildes, dessen Werte mit einem konstanten Faktor multipliziert werden.

Hier stellt sich die Frage, wann das neue Maß optimal arbeiten würde, d.h. wann sich der Faktor wieder vollständig herausrechnen ließe. Dazu dürfte es nicht zu Rundungsfehlern bei der Berechnung der RGB-Vergleichswerte kommen. Da die Werte für die jeweiligen Farbkanäle zwischen 0 und 255 liegen, müssten bei einem ganzzahligen Faktor f die Ausgangswerte idealerweise alle kleiner als $255/f$ sein, da rechnerisch entstandene Werte über 255 auf eben diesen Maximalwert geclippt werden.

Zum Testen wird hier ein monochromes Bild mit Farbwerten kleiner 100 verwendet. Für den Vergleich wurde es dann mit dem Faktor 2 multipliziert. Bei einem monochromen Bild wäre die Komponente $I_{log} - I_{quer}$ des neuen Maßes stets gleich 0. Deswegen wurde den Bildern vor der Berechnung Rauschen hinzugefügt (s. Abb. 4.8). Hier wurde zunächst auf die Verwendung des Offsets verzichtet, da der Offset für die Logarithmierung die Verhältnisse der RGB-Werte beeinflussen würde. Da das Bild an keinem Punkt den Wert 0 annimmt, war dies möglich. Tatsächlich unterscheiden sich die errechneten Pixeldifferenzwerte erst an der siebten Nachkommastelle. Unter idealen Bedingungen erfüllt das neue Maß seinen Zweck also ausgezeichnet.

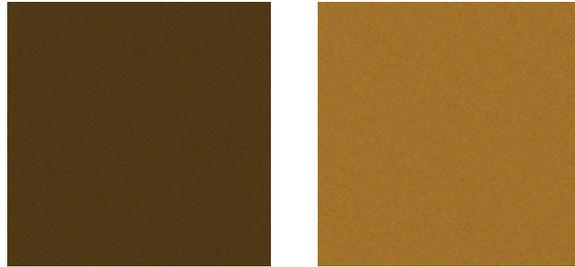


Abbildung 4.8: künstliches Testbild und Vergleichsbild

In einem zweiten Versuch werden nun natürliche Endoskopbilder als Testvorlage verwendet (s. Abb. 4.9). Die Vergleichsbilder werden mit dem Faktor 1,25 multipliziert; bei der Logarithmierung wird hier wieder ein Offset verwendet. Bei 10 Messungen ergab sich dabei im Mittel ein Differenzwert von 0,008. Dieser Wert liegt tatsächlich noch unter dem gemittelten Wert für die Differenzminima aus der vorangegangenen Messung in Abschnitt 4.2, ist also sehr klein. Die Abweichung von 0 erklärt sich, wie bereits erwähnt, aus der Tatsache, dass beim Multiplizieren der RGB-Werte diese wiederum auf ganze Zahlenwerte zwischen 0 und 255 abgebildet werden; es werden also durchaus gerundete Werte verwendet. Außerdem werden die RGB-Werte mit einem Offset beaufschlagt. Dies verändert ihr Verhältnis, was sich auch auf das Gesamtdifferenzergebnis auswirkt. Daher kann sich im Endergebnis der Faktor, mit dem zuvor multipliziert wurde, nicht wieder vollständig herauskürzen lassen. Die Abweichung von 0 kann jedoch als marginal bezeichnet werden.

Der gedankliche Ansatz, der hinter dem neuen RGB-Maß steckt, wird also durch diesen Test bestätigt. Das RGB-Maß lieferte, wie erwartet, durchweg sehr kleine Werte. Für die 10 Messungen lag die Grauwertdifferenz im Schnitt bei 24. Die logarithmischen Differenzwerte des RGB-Maßes lassen sich jedoch nicht ohne weiteres mit den linearen

Werten des Grauwertmaßes vergleichen. Abschnitt 4.5 zeigt deswegen einen Ansatz um die Zahlen, die beide Maße liefern, vergleichbar zu machen.

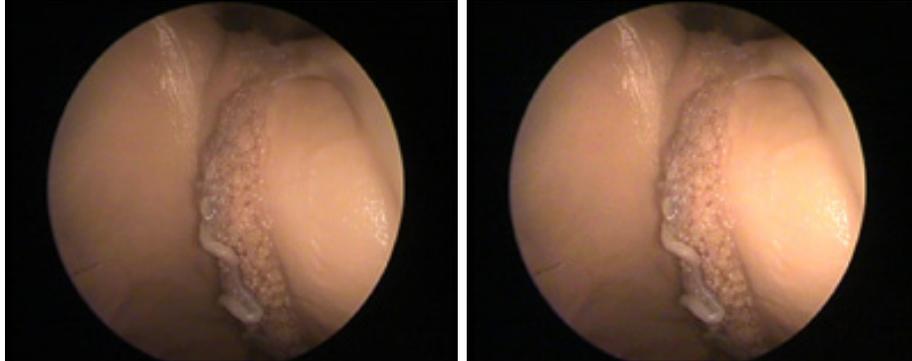


Abbildung 4.9: natürliches Testbild und Vergleichsbild

4.4 Wahl der Parameter

Bevor die beiden Maße genauer miteinander verglichen werden, soll zunächst untersucht werden, wie sich eine Veränderung der in Abschnitt 4.1 beschriebenen Parameter *Offset*, *Stärke der Filterung*, *Norm* auf das Gesamtergebnis auswirken würde. Es ist davon auszugehen, dass

- ein höherer Offset zu niedrigeren Differenzen führt,
- eine stärkere Tiefpassfilterung zu höheren Differenzen führt und
- die Euklidische Norm kleinere Werte liefert als die SAD.

Für den späteren Vergleich liegen bisher keine Referenzwerte vor. Wie gut das RGB-Maß in unterschiedlichen Situationen arbeitet, kann also bislang nur geschätzt werden. Da es noch keine konkreten Werte gibt, soll

der Einfluss der Parameter möglichst konstant gehalten werden. Somit können dann allgemeingültige Aussagen gemacht werden. Es bietet sich also an, den Einfluss der jeweiligen Parameter vor Beginn des Vergleichs der Maße zu untersuchen, um so die optimalen Werte für die Parameter zu finden.

4.4.1 Der Einfluss des Offsets

In der praktischen Anwendung des RGB-Maßes ist die Verwendung eines Offsets erforderlich. Im Laufe der Berechnungen werden alle Werte für die Farbkanäle logarithmiert. Wie die Farbhistogramme der verwendeten endoskopischen Bilder zeigen, kommt es - wenn auch vereinzelt - vor, dass die Farbkanäle Werte von 0 aufweisen (s. Abbildung 4.10).

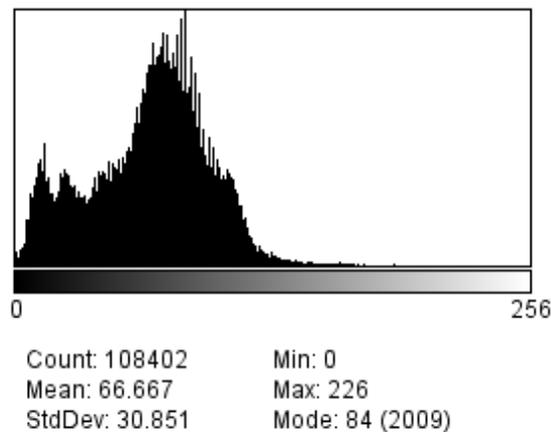


Abbildung 4.10: Histogramm des Blaukanals einer endoskopischen Aufnahme

Natürlich muss eine Berechnung von $\log(0)$ verhindert werden. Hierzu wird der genannte Offset benötigt. Wie bereits gezeigt wurde, würde sich beim Vergleich zweier Pixel aus konsekutiven Bildern eine Beleuchtungsveränderung im Idealfall komplett herausrechnen lassen. Aufgrund

der multiplikativ wirkenden Beleuchtung bliebe das Verhältnis der RGB-Werte zueinander unverändert. Da die RGB-Werte aber mit einem Offset beaufschlagt werden müssen, ist dies nicht mehr uneingeschränkt der Fall. Tabelle 4.4 soll dies an einem einfachen Beispiel, bei angenommenem Offset von 1, verdeutlichen.

	Bild 1	Bild 2
ohne Offset	$\frac{100}{50} = 2$	$\frac{200}{100} = 2$
mit Offset	$\frac{101}{51} = 1,98$	$\frac{201}{101} = 1,99$

Tabelle 4.4: Verhältnis zweier Farbwerte mit und ohne Offset

In den verwendeten Test-Plugins kann der Offset frei eingestellt werden. Es stellt sich aber die Frage, welcher Wert hier sinnvoll ist und wie sich unterschiedliche Einstellungen auf die Differenzbildung auswirken. Abbildung 4.11 zeigt, wie sich die Differenzwerte in Abhängigkeit vom gewählten Offset verändern. Verglichen wurden ähnliche Pixel, wobei den genauen Werten hier keine Beachtung geschenkt werden muss, da lediglich die Tendenz veranschaulicht werden soll. Wie ersichtlich ist,

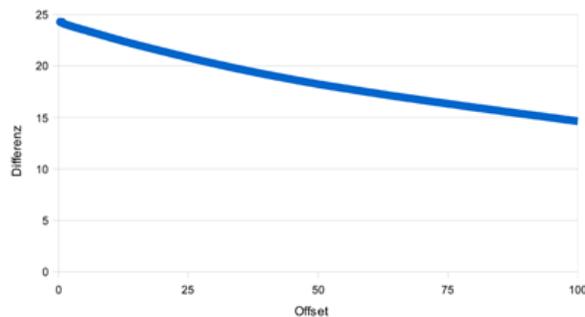


Abbildung 4.11: Differenzwert in Abhängigkeit des Offsets

sind Offset und Differenzwert antiproportional verknüpft. Dies muss so

sein, da man mit größer werdendem Offset die zu vergleichenden Werte auf einer logarithmischen Kurve immer weiter nach rechts verschiebt. Da sich die Steigung der Kurve dort immer mehr 0 nähert, müssen auch ihre Funktionswerte immer näher zusammenrücken. Genauso steigen die Differenzwerte bei sinkendem Offset an. Wie bereits oben gezeigt wurde, wirkt sich der Offset auf das Verhältnis der RGB-Werte aus und verändert dieses. Da das hier untersuchte Vergleichsmaß aber genau darauf aufbaut, dass die Verhältnisse der RGB-Werte unverändert bleiben, soll im Folgenden ein möglichst kleiner Offset verwendet werden. Differenzwerte die mit einem Offset von 0 und einem Offset von 0,01 berechnet wurden, unterscheiden sich im Schnitt erst an der dritten Nachkommastelle. Ein Offset von 0,01 ist demzufolge als hinreichend klein anzunehmen und soll für die weiteren Tests verwendet werden.

4.4.2 Der Einfluss der Glättung

Es hat sich gezeigt, dass die Komponente $I_{log} - I_{quer}$ wesentlich zum Gesamtergebnis der pixelweisen Differenzbildung beiträgt (s. Abschnitt 4.2). In den folgenden Tests soll daher der Einfluss der Stärke der Tiefpassfilterung auf das Gesamtergebnis genauer untersucht werden.

Für einen Pixelvergleich wurde die Stärke des Tiefpasses zwischen 1 und 5 variiert. Die Komponenten $B_{log} - G_{log}$ und $R_{log} - G_{log}$ blieben unverändert. Abbildung 4.12 zeigt die RGB-Differenz in Abhängigkeit von der Stärke der Tiefpassfilterung und damit von $I_{log} - I_{quer}$.

Mit stärkerer Filterung wird der Einfluss der umgebenden Pixel immer stärker. Das bedeutet, dass auch vom Beobachtungsort weiter entfernt liegende Pixel beginnen, stärker auf das Filterergebnis einzuwirken. Man sieht, dass die Gesamtdifferenz dadurch ansteigt.

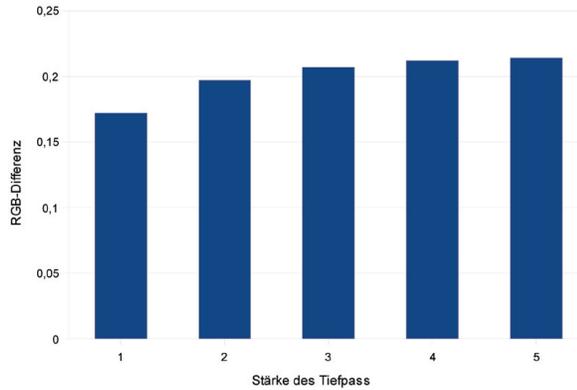


Abbildung 4.12: Einfluss der Tiefpassfilterung auf das Gesamtergebnis

Mit der Komponente $I_{log} - I_{quer}$ wird die punktuelle Helligkeit ins Verhältnis zur lokalen Helligkeit gesetzt. Die Glättung von I_{log} zu I_{quer} dient hierbei dem Zweck einen Wert für die lokale Helligkeit zu bestimmen. Es können dabei zwei Extremsituationen auftreten:

- Die Glättung ist zu schwach. I_{quer} würde sich nur geringfügig von I_{log} unterscheiden. Ein Pixel wäre also über diese Komponente nicht gut identifizierbar.
- Die Glättung wirkt zu stark. In diesem Fall würden sich auch weit entfernte Pixel stark auf den jeweiligen Wert von I_{quer} auswirken⁴. Er würde damit also nicht mehr die *lokale* Helligkeit repräsentieren. Auch in diesem Fall würde die Komponente $I_{log} - I_{quer}$ nicht mehr wesentlich zur Identifizierung eines Pixels beitragen können.

Die Filterung sollte also stark sein, jedoch nicht so stark, dass jegliche Struktur des Bildinhalts verloren geht und es zur Entstehung von homogenen Flächen kommt (s. Abbildung 4.13). Damit wäre der Mittelwert

⁴Da es sich beim hier verwendeten Tiefpass um ein rekursives Filter handelt, fließen immer alle Pixelwerte ins Filterergebnis ein.

der lokalen Helligkeit über weite Bereiche gleich und somit uneindeutig.

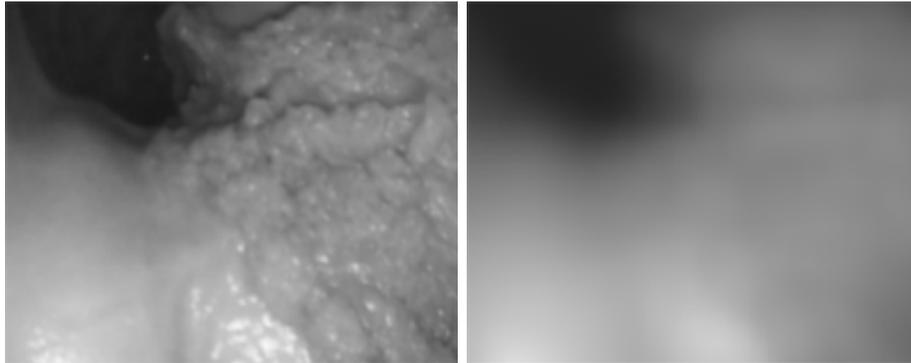


Abbildung 4.13: sehr schwach (Wert 1) und sehr stark (Wert 15) gefiltertes Bild

In den Test-Plugins kann die Stärke des Tiefpasses frei gewählt werden. Hierzu gibt man mit der Variablen *pass* an, wie stark die zur Berechnung verwendeten Pixelwerte in das Filterergebnis eingehen sollen. Dieser Wert wird praktischerweise als ganze Zahl angegeben. Listing 4.1 zeigt die Verwendung der Variablen *pass*.

Listing 4.1: Verwendung der Variablen *pass*

```

1 private void ProcessImage(int breite, int hoehe, float[] i){
2
3     int x, y;
4     double a = pass;
5     double b = 1. / ( 1. + a );
6     for ( y = 0; y < hoehe; y++){
7         for ( x = 1; x < breite; x++){
8             int pos = y * breite + x;
9             if (mask_ip.getPixelValue(x, y)==1 && mask_ip.
10                getPixelValue(x-1, y)==1){
11                 i[ pos ] = (float) ((i[ pos ] + a * i[ pos - 1 ])
12                    * b );
13             }
14         }
15     }
16 }

```

Eine Reihe von Bildern wurde zunächst mit unterschiedlicher Stärke gefiltert. Die Begutachtung der Ergebnisse zeigt, dass ein Wert von 5 sinnvolle Ergebnisse liefert. Abbildung 4.14 zeigt ein entsprechendes Bild.

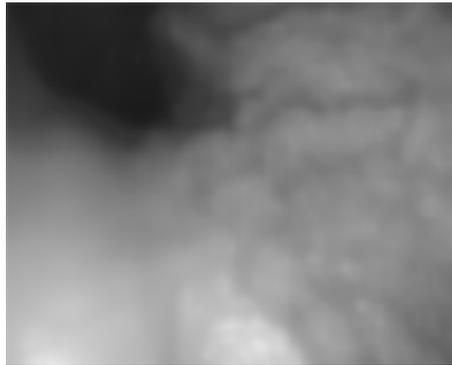


Abbildung 4.14: mit Wert 5 gefiltertes Bild

4.4.3 Wahl der Norm

Um die Ähnlichkeit eines Pixelpaares zu berechnen, werden bei dem hier untersuchten RGB-Maß zunächst die komponentenweisen Differenzen gebildet und diese dann aufaddiert, wie in Abschnitt 3.1 beschrieben. In den verwendeten Testplugins ist es vorgesehen, dazu die 1-Norm, die Summe der absoluten Differenzen, oder alternativ die 2-Norm, die Euklidische Norm, verwenden zu können (s. Abschnitt 3.1.2). Bei der 2-Norm werden allerdings größere Differenzen aufgrund der Quadrierung stärker gewichtet als kleinere. Somit ist es möglich, dass ein Vergleichspunkt $P1$ nach der 1-Norm einen größeren Abstand vom Referenzpunkt hat als ein Punkt $P2$,

nach der 2-Norm aber einen geringeren. Im Rahmen dieser Arbeit führte jedoch die Verwendung der 2-Norm weder zu besseren noch zu schlechteren Ergebnissen. Die Differenzminima fanden sich stets an den gleichen Stellen, unabhängig von der verwendeten Norm. Auf die Darstellung der Verwendung der 2-Norm wurde deswegen im Weiteren verzichtet und nur die Summe der absoluten Differenzen verwendet. Der umgekehrte Fall wäre auch möglich gewesen.

4.5 Angleichung der Differenzwerte

Das Grauwertmaß liefert definitionsgemäß Differenzwerte zwischen 0 und 255, wobei die Ergebnisse des RGB-Maßes viel kleiner ausfallen. Um letztlich RGB-Maß und Grauwertmaß besser miteinander vergleichen zu können, soll nun versucht werden, die Differenzwerte für beide Maße zueinander in Relation zu setzen. Dabei wird wie folgt vorgegangen. Für eine Reihe von Bildern werden jeweils für ein Referenzpixel die Differenzen zu allen nicht ähnlichen Pixeln im Bild errechnet. Hierzu wird ein geeignetes ImageJ-Plugin verwendet. Es berechnet zu einem gewählten Referenzpixel die Differenzen zu allen übrigen Bildpunkten und gibt für beide Maße die Ergebnisbilder aus.

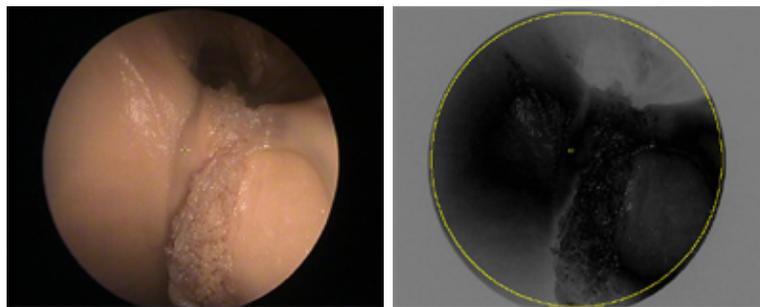


Abbildung 4.15: Testbild und markierte ROI im Differenzbild

Mit einer selektiven Region of Interest (ROI), d.h. unter Ausschluss der Elemente in unmittelbarer Nähe des Referenzpixels und der Histogrammfunktion lassen sich dann einfach der mittlere Differenzwert für alle unähnlichen Pixel anzeigen (s. Abbildungen 4.16 und 4.15).

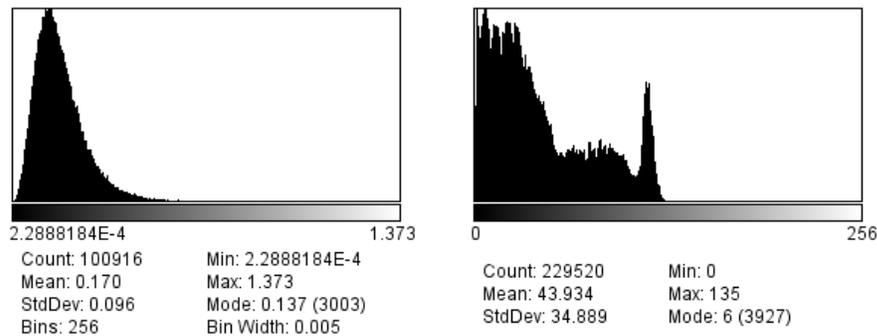


Abbildung 4.16: Histogramme der Differenzbilder für unähnliche Pixel (RGB-links, GW-rechts)

Macht man dies für beide Maße und bildet das Verhältnis der jeweils gemittelten Ergebnisse, so erhält man einen Skalierungsfaktor. Damit lassen sich für alle weiteren Messungen die RGB-Differenzwerte den Grauwertdifferenzen angleichen. Konkret erhält man dadurch für unähnliche Pixel Differenzen in der gleichen Größenordnung.

Natürlich sind die Ergebnisse des RGB-Vergleichs nachwievor logarithmisch skaliert und die des Grauwertvergleichs linear. Die Zahlenwerte lassen sich also nicht einfach gleichsetzen. Deswegen wird bei den nachfolgenden Tests stets der Ort betrachtet, an dem die Maße ihr Minimum haben. Die hier gewählte Art der Skalierung hat dabei den Vorteil, dass die Größenordnung der Ergebnisse in etwa gleich ist. Es hätte aber auch eine beliebige andere Skalierung gewählt werden können. Beispielsweise wäre auch eine Linearisierung der RGB-Differenzwerte mithilfe der e-

Funktion⁵ denkbar.

Mit dem oben beschriebenen Vorgehen ergab sich hier aus zwanzig Bildern ein Differenzwert von 40 für unähnliche Pixel für das Grauwertmaß und ein Differenzwert von 0,397 für das RGB-Maß. Für die Skalierung resultiert daraus ein Faktor von 101. In den nachfolgenden Tests werden also die errechneten RGB-Differenzwerte mit diesem Faktor multipliziert.

4.6 Vergleich der Maße

Ausgehend von den oben beschriebenen Überlegungen zur Verwendung der Plugins, wird im Folgenden der direkte Vergleich der beiden Maße mit dem Plugin *Area* durchgeführt. Die Einstellungen dabei sind *Tiefpassstärke = 5*, *Offset = 0,01* und *Norm: SAD*. Die Vergleiche sind in vier Gruppen gegliedert, wobei sich die Bildinhalte von Referenzbild und Vergleichsbild immer stärker unterscheiden, um so die beiden Maße unter verschiedenen Bedingungen miteinander vergleichen zu können.

Zunächst werden Bildpaare mit besonders geringem Versatz verglichen, dann folgen Bildpaare mit größerem Versatz und abschliessend wird untersucht, welche Ergebnisse die beiden Maße bei starken Beleuchtungsunterschieden liefern.

Um die Treffergenauigkeit der Maße beurteilen zu können, werden jeweils Referenzpixel gewählt, deren Entsprechung innerhalb einer Sequenz stets mit bloßem Auge wiedergefunden werden kann. Zu jedem Vergleich wird das entsprechende Bildpaar gezeigt, sowie eine Tabelle, die die wichtigsten Ergebnisse zusammenfasst. Dabei wird auch jeweils der zeitliche Versatz in Frames angegeben. Die absolute Zahl spielt allerdings keine entscheidende Rolle. Wichtig für die Ergebnisse ist in erster Linie, wie weit sich

⁵Softwareseitig wird zur Logarithmierung der RGB-Werte der *natürliche* Logarithmus verwendet.

die Bildinhalte tatsächlich gegeneinander verschoben haben und wie sich die lokale Beleuchtung verändert hat. Die Angabe des Versatzes in Frames dient nur dazu, die Tests zu benennen und voneinander abgrenzen zu können.

Wie sich im Verlauf der Tests gezeigt hat, variieren die Differenzwerte auch für ähnliche Pixel sehr stark, es ist also nicht sinnvoll einen Schwellenwert festzulegen, bei dessen Unterschreitung Ähnlichkeit angenommen werden kann. Zudem kann bei der Wahl des korrespondierenden Pixels per Mausklick nicht davon ausgegangen werden, dass dieses immer auch getroffen wird. Das verwendete Testplugin vergleicht aus diesen Gründen auch die umgebenden Pixel mit der Referenz. Die Ergebnistabellen zeigen das Differenzminimum der betrachteten 21x21 Pixel großen Region. Dies sollte natürlich bestenfalls anzeigen, an welcher Stelle das korrespondierende Pixel zu finden ist. Außerdem sind stets Mittelwert und Standardabweichung für die Differenzwerte der gesamten Region angegeben.

Um zunächst einschätzen zu können, ob die gelieferten Differenzen als klein anzusehen sind, wurden im Vorfeld aus einer Reihe von Bildern die Differenzwerte für die unmittelbare Umgebung (9 Pixel) eines gewählten Testpixels untersucht. Für das RGB-Maß ergab sich hier ein Wert von 10, für das Grauwertmaß ein Wert von 2.

4.6.1 Vergleiche mit geringem Abstand

Dieser Abschnitt zeigt den Vergleich mehrerer ähnlicher Pixel. Ähnlich bedeutet hier, dass Referenzbild und Vergleichsbild zeitlich nur wenige Frames voneinander entfernt sind, hier maximal 12 Frames. Damit stimmen auch die Bildinhalte weitestgehend überein und die Beleuchtung innerhalb der betrachteten Szene variiert nur wenig zwischen den verglichenen Bildern. Erwartungsgemäß liefern hier beide Maße

Ergebnisse, nach denen ein Pixel gut identifizierbar ist. Für Vergleich 1 wurden zwei Bilder verwendet die in der Originalsequenz unmittelbar aufeinander folgen, was hier einem zeitlichen Abstand von 40 ms entspricht. Die Bildinhalte unterscheiden sich also nur geringfügig. Gleiches gilt für die lokale Beleuchtung. Als Referenzpixel wurde ein - auch mit bloßem Auge - gut wiederauffindbarer Bildpunkt gewählt, der sich aufgrund seiner Helligkeit von der unmittelbaren Umgebung abhebt (s. Abbildung 4.17). Im Vergleich liefern sowohl Grauwertmaß als auch RGB-Maß minimale Werte (s. Tabelle 4.5). Beide haben außerdem ihr Minimum an der gleichen Stelle der betrachteten 21x21 Region, bei der es sich mit großer Sicherheit um die Entsprechung des Referenzpixels im Vergleichsbild handelt.

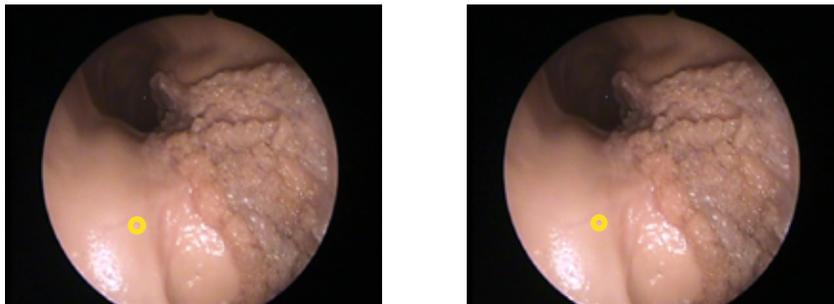


Abbildung 4.17: Testbilder zu Vergleich 1, zeitlicher Versatz 1 Frame

	Δ_{min}	MW ⁶	SD ⁷
RGB	2,9	27,8	6,4
GW	2	17,7	4,3

Tabelle 4.5: Ergebnisse aus Vergleich 1

⁶Mittelwert und

⁷Standardabweichung der Differenzen

Auch bei Vergleich 2 werden sehr ähnliche Bilder miteinander verglichen. Die Ergebnisse bestätigen auch hier, dass bei nur geringfügig verändertem Bildinhalt beide Maße gleich gut arbeiten. Beide haben auch wieder an der gleichen Stelle ihr Minimum. Abbildung 4.19 zeigt die Differenzwerte für alle Felder der 21x21 Region als Plot, wobei die Felder zeilenweise durchlaufen werden. Es ist zu erkennen, dass der Verlauf der Differenzwerte entlang der Zeilen auch generell für beide Maße sehr ähnlich ist.

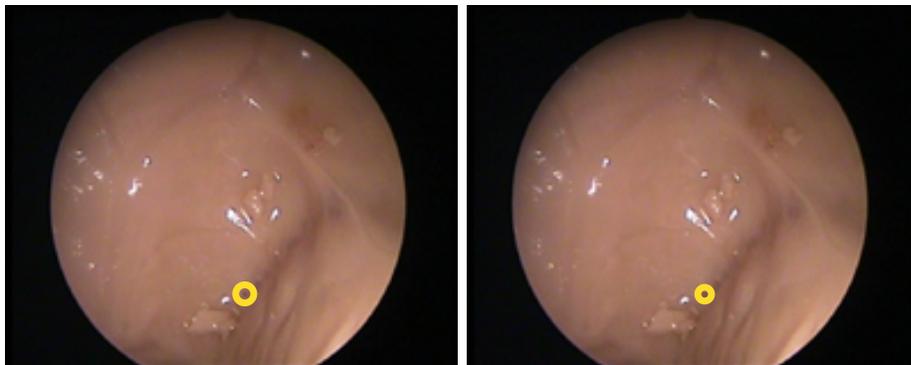


Abbildung 4.18: Testbilder zu Vergleich 2, zeitlicher Versatz 1 Frame

	Δ_{min}	MW	SD
RGB	6,8	177,7	22,9
GW	2	40,6	9,1

Tabelle 4.6: Ergebnisse aus Vergleich 2

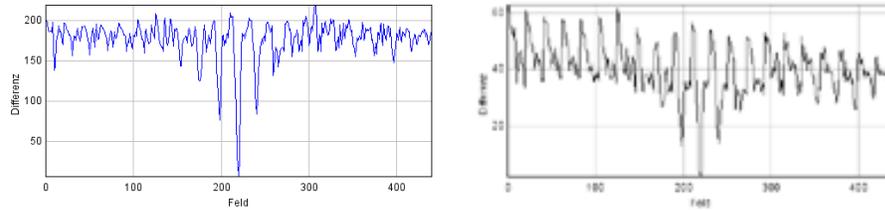


Abbildung 4.19: Differenzwerte für RGB(links) und Grauwerte(rechts) bei Vergleich 2

Für den dritten Vergleich wird der Abstand zwischen den Bildern etwas erhöht. Die zeitliche Entfernung zwischen Bild 1 und Bild 2 beträgt hier 120 Millisekunden (Das entspricht drei Frames.). Auch hier finden beide Maße ihr Minimum an der gleichen Stelle. Der kleinste Wert liegt für das Grauwertmaß allerdings bei 4 und für das RGB-Maß bereits bei 23,9. Mittelwert und Standardabweichung sind jeweils, verglichen mit der vorherigen Messung, nahezu unverändert geblieben. Der nächstgrößere Wert für die Grauwertdifferenzen liegt bei 10, für die RGB-Differenzen liegt er bei 58,3.

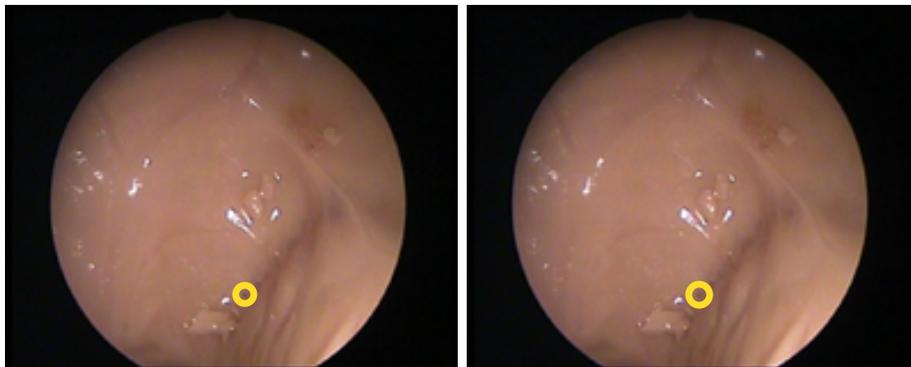


Abbildung 4.20: Testbilder zu Vergleich 3, zeitlicher Versatz 3 Frames

	Δ_{min}	MW	SD
RGB	23,9	179,7	23,4
GW	4	41,9	8,6

Tabelle 4.7: Ergebnisse aus Test 3

Für den nächsten Test (Vergleich 4) wird ein Bildpaar mit einem zeitlichen Abstand von 6 Frames verwendet. Nachwievor wird jeweils der richtige Bildpunkt im Vergleichsbild erkannt. Im Vergleich zu den vorherigen Tests steigen hier die minimalen Differenzwerte für die gewählten Vergleichspunkte für beide Maße bereits deutlich an. Sie liegen bei 95,5 für das RGB-Maß und 17 für das Grauwertmaß. Mittelwert und Standardabweichung verändern sich auch hier nur geringfügig, bezogen auf die vorangegangenen Messungen.

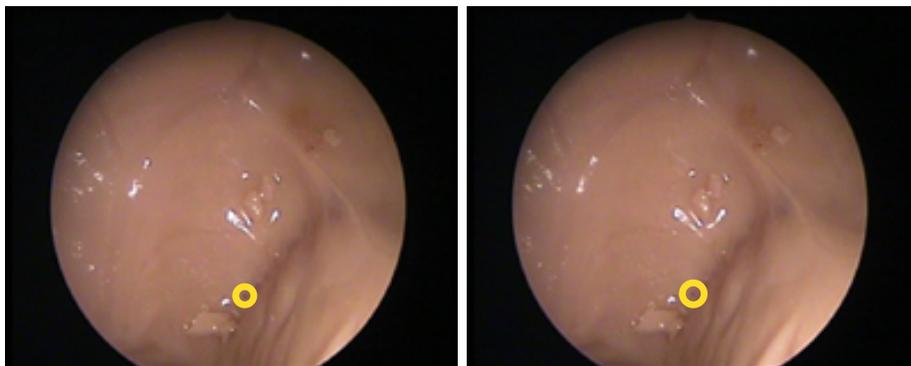


Abbildung 4.21: Testbilder zu Vergleich 4, zeitlicher Versatz 6 Frames

	Δ_{min}	MW	SD
RGB	95,5	186,6	16,4
GW	17	44,4	8,2

Tabelle 4.8: Ergebnisse aus Test 4

Bei dem fünften Vergleich ergeben sich das erste Mal Unterschiede in der Bewertung der Pixeldifferenzen. Zwar finden beide Maße wieder für den selben Punkt ihren Minimalwert, allerdings stellt das Grauwertmaß dieselbe Differenz noch für zwei weitere Pixel fest, die unmittelbar daneben liegen. Im Vergleichsbild stimmen die Werte der Farbkanäle der entsprechenden Punkte tatsächlich exakt überein, weswegen sie vom Grauwertmaß nicht unterschieden werden können. Dies wäre aber auch nicht möglich, wenn lediglich ihre Summe übereinstimmen würde. Auch die Komponenten $B_{log} - G_{log}$ und $R_{log} - G_{log}$ des RGB-Maßes stimmen für alle drei Stellen, an denen die minimale Grauwertdifferenz angegeben wird, überein. Den Unterschied macht jedoch die Komponente $I_{log} - I_{quer}$, da sie ein Pixel auch über seine Umgebungshelligkeit definiert. Hier unterscheiden sich also die Ergebnisse beider Maße das erste Mal. Das RGB-Maß liefert ein eindeutiges Ergebnis, das Grauwertmaß kann aufgrund der größeren Abstufung seiner Ergebnisse und seiner weniger differenzierten Informationsverarbeitung allerdings nicht mit derselben Eindeutigkeit ein Ergebnis liefern. Siehe hierzu die Abbildungen 4.22 und 4.23, sowie Tabelle 4.9.

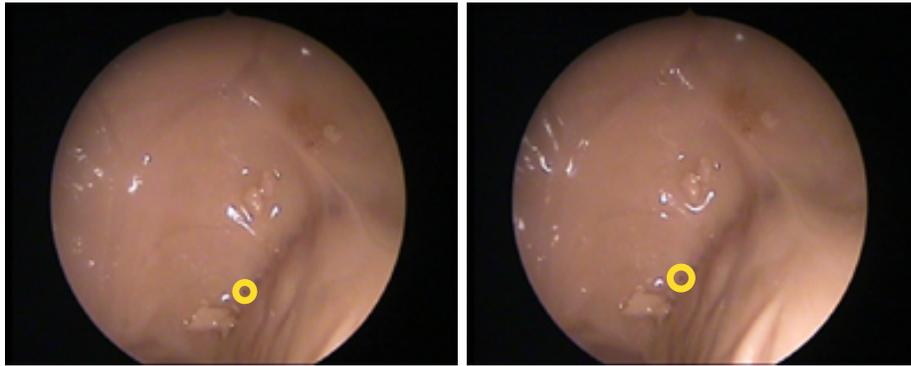


Abbildung 4.22: Testbilder zu Vergleich 5, zeitlicher Versatz 12 Frames

	Δ_{min}	MW	SD
RGB	108,6	183,9	16,5
GW	20	44,3	8,5

Tabelle 4.9: Ergebnisse aus Test 5

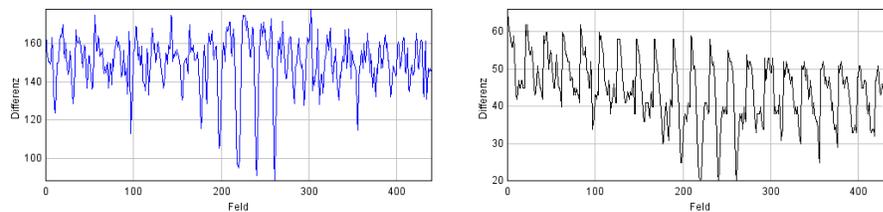


Abbildung 4.23: Differenzwerte für RGB(links) und Grauwerte(rechts) bei Vergleich 5

4.6.2 Vergleiche bei größerem Abstand

In diesem Abschnitt wird für ein festes Referenzbild und -pixel der Abstand zu den Vergleichsbildern zwischen 4 und 67 Frames variiert. Die Bildinhalte sind also zum Teil stark gegeneinander verschoben. Die Beleuchtungssituation ändert sich für die betrachteten Pixelorte über die Zeit hier allerdings zunächst nur wenig. Bei den letzten beiden Vergleichen macht sich der Beleuchtungsunterschied dann stärker bemerkbar. Beim Vergleich 6 (Versatz von vier Frames) zeigen sich noch keine bemerkenswerten Unterschiede in den Ergebnissen, die beide Maße liefern. Das „richtige“ Pixel wird von beiden erkannt, und es gibt auch keine ausgeprägten Nebenminima.

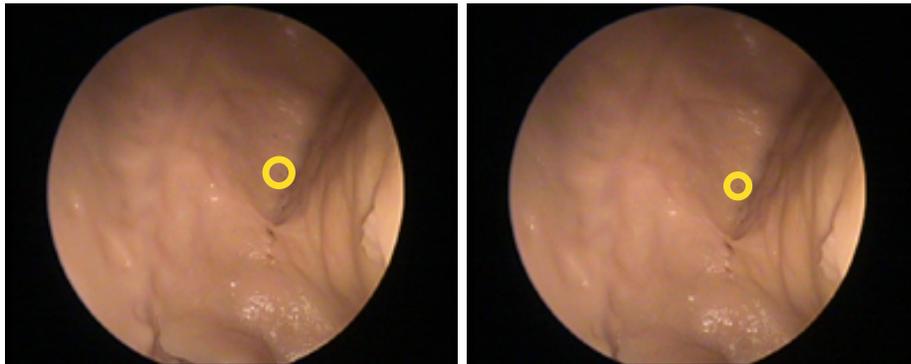


Abbildung 4.24: Testbilder zu Vergleich 6, zeitlicher Versatz 4 Frames

	Δ_{min}	MW	SD
RGB	40,3	213,7	27,6
GW	10	50,7	8,5

Tabelle 4.10: Ergebnisse aus Test 6

Beim siebten Vergleich beträgt der Versatz der Bilder bereits 35 Frames, und die Bildinhalte sind auch stark gegeneinander verschoben. Trotzdem zeigen sich auch hier noch keine ausgeprägten Unterschiede in den Ergebnissen. Beide Maße finden das Minimum wieder an der gleichen und vermutlich⁸ richtigen Stelle. Für das Grauwertmaß liegt das Minimum bei 18 und die nächstgrößere Differenz bei 20, für das RGB-Maß sind die entsprechenden Werte 84,4 und 93,4. Der Differenzmittelwert steigt für beide Maße insgesamt etwas an.

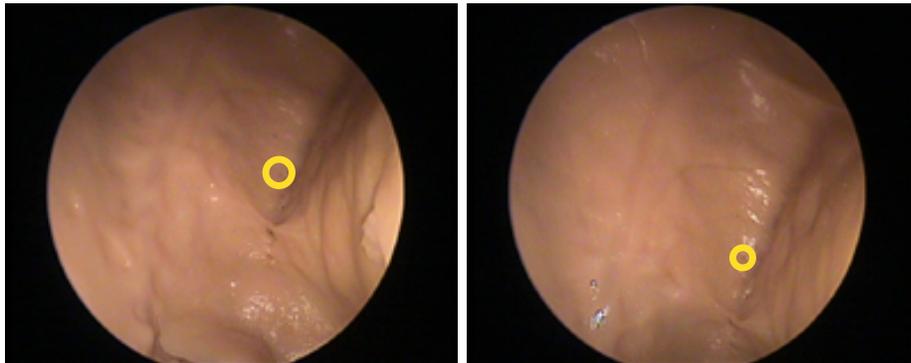


Abbildung 4.25: Testbilder zu Vergleich 7, zeitlicher Versatz 35 Frames

	Δ_{min}	MW	SD
RGB	84,4	220,1	37,8
GW	18	55,7	13,2

Tabelle 4.11: Ergebnisse aus Test 7

⁸Der Abgleich erfolgt hier mit bloßem Auge, weswegen eine Restunsicherheit verbleibt.

Im achten Vergleich liegen dann die Differenzminima beider Maße nicht mehr an derselben Stelle. Der beobachtete Bereich im Vergleichsbild ist hier bereits sehr nah an den Bildrand gerückt. Dort ist die Szene wesentlich dunkler als in der Bildmitte, in der sich das Referenzpixel befindet (s. Abbildung 4.26). Die betrachteten RGB-Werte weisen hier also deutlich geringere Werte auf. Das führt sogleich dazu, dass das Grauwert-Maß weniger gute Ergebnisse liefert. An der vom RGB-Maß richtig erkannten Stelle des Korrespondenzpixels liefert das Grauwert-Maß einen Wert von 12. An 14 weiteren Stellen⁹ liefert es sogar Differenzwerte unter 12. Außerdem ist hier hervorzuheben, dass der Mittelwert der Differenzen, die das Grauwert-Maß liefert hier verglichen mit den vorangegangenen Messungen sehr stark abgefallen ist. Dies ist ein weiteres Indiz dafür, dass die Grauwertbetrachtung bei stark veränderter Beleuchtung weniger differenzierte Ergebnisse liefert als das RGB-Maß. Für dieses ist der Mittelwert nahezu unverändert geblieben (s. Tabelle 4.12).

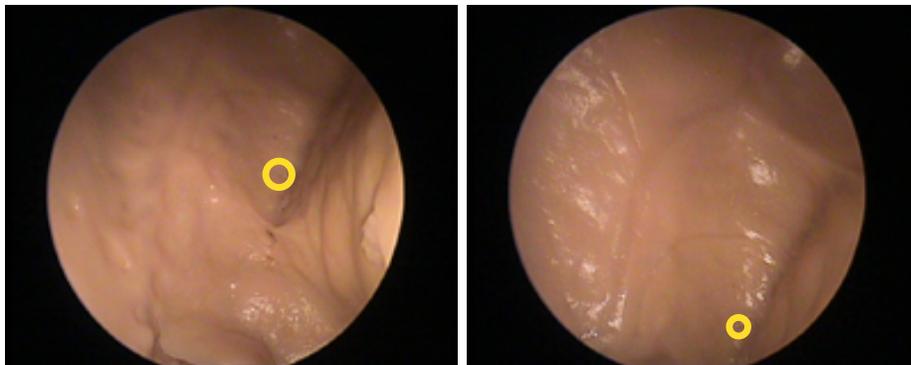


Abbildung 4.26: Testbilder zu Vergleich 8, zeitlicher Versatz 56 Frames

⁹Pro Messung werden jeweils 441 Bildpunkte betrachtet.

	Δ_{min}	MW	SD
RGB	10,5	222,8	40,8
GW	0	30,6	13,4

Tabelle 4.12: Ergebnisse aus Test 8

Für den letzten Vergleich dieser Reihe wurde der Abstand zwischen den verglichenen Bildern auf 67 Frames erhöht. Die Lage des Vergleichspixels befindet sich nun am äußersten Rand der Szene, was eine nochmal geringere lokale Beleuchtung bedeutet (s. Abbildung 4.27). Wie bereits bei der vorigen Messung, kann das Grauwert-Maß die Entsprechung des Referenzpixels hier nicht mehr identifizieren. Beide Maße liefern ihr Minimum an unterschiedlichen Stellen, wobei das RGB-Maß selbst unter den stark veränderten Beleuchtungsbedingungen den gesuchten Bildpunkt wiederfindet. An dieser Stelle gibt das Grauwert-Maß einen Wert von 10 an, wobei es auch für 27 weitere Bildpunkte diese Differenz angibt. Für 95 Bildpunkte errechnet sich eine Grauwertdifferenz kleiner 10. Der Differenzmittelwert ist verglichen mit der vorherigen Messung für die Grauwerte nochmals um die Hälfte abgesunken, auf 30% des Werts zu Beginn dieser Reihe. Für die RGB-Differenzen ist er insgesamt leicht angestiegen.

	Δ_{min}	MW	SD
RGB	111,1	220,0	32,1
GW	0	14,9	8,1

Tabelle 4.13: Ergebnisse aus Test 9

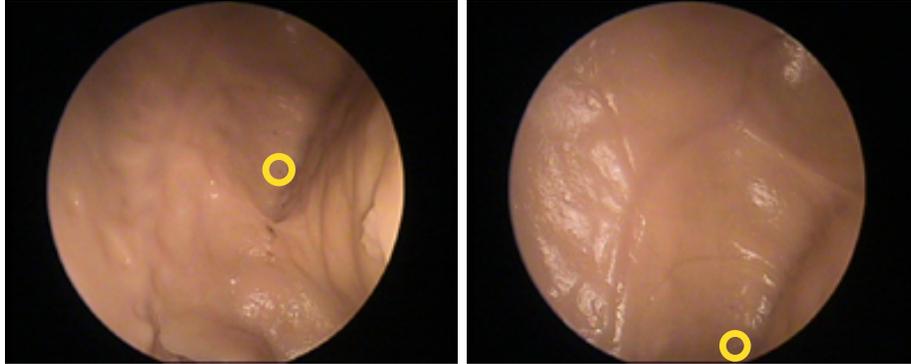


Abbildung 4.27: Testbilder zu Vergleich 9, zeitlicher Versatz 67 Frames

4.6.3 Vergleiche bei starken Beleuchtungsunterschieden

In den vorherigen Testreihen hat sich gezeigt, dass RGB-Maß und Grauwertmaß zunächst beide gute Ergebnisse liefern, selbst bei einem größeren Versatz zwischen den Bildern. Wenn sich die Beleuchtungsbedingungen der beobachteten Szene aber änderten wurden die Ergebnisse der Grauwertbetrachtung mehrdeutig, die des RGB-Maßes blieben konstant gut. Da dies zu den erhofften Eigenschaften des RGB-Maßes zählt, sollen hier nun weitere Bilder miteinander verglichen werden, die starke Beleuchtungsunterschiede aufweisen. Die Bilder aus der hier verwendeten Sequenz weisen alle eine starke Abschattung im oberen Bildbereich auf. Das Referenzpixel entstammt der Bildmitte, wobei die korrespondierenden Pixel immer mehr Richtung Bildrand und damit in den abgeschatteten Bereich wandern.

Bei Vergleich Nr. 10, dem ersten in dieser Reihe, liegen die Bilder recht nah beieinander (s. Abbildung 4.28).

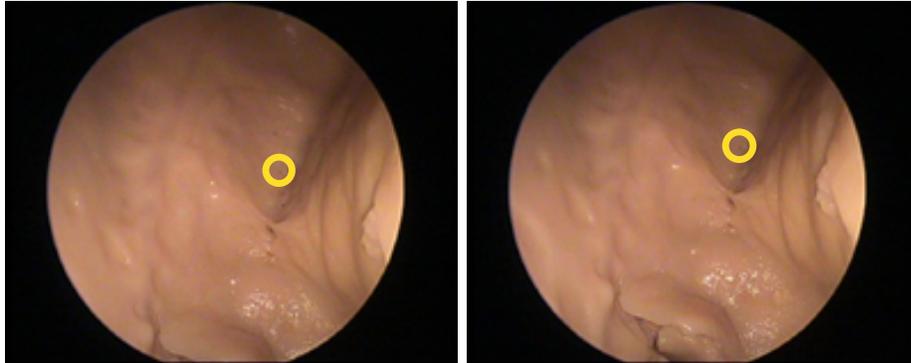


Abbildung 4.28: Testbilder zu Vergleich 10, zeitlicher Versatz 10 Frames

Entsprechend ähnlich fallen auch wieder die Ergebnisse für beide Maße aus. Allerdings findet sich der minimale Differenzwert für das Grauwert-Maß (4) gleich zweimal und zwar bei benachbarten Bildpunkten. Das RGB-Maß kann zwischen den beiden Pixeln unterscheiden. Ausschlaggebend sind dabei die Komponenten $B_{log} - G_{log}$ und $R_{log} - G_{log}$ des neuen Maßes. Beide nehmen extrem kleine Werte an. Da hier die Summe der Werte der Farbkanäle für zwei Bildpunkte gleich ist, kann das Grauwert-Maß diese nicht unterscheiden. Das RGB-Maß kann aber über die *Verhältnisse* der Farbkanäle die Unterscheidung treffen.

	Δ_{min}	MW	SD
RGB	18,2	223,7	26,9
GW	4	35,2	6,8

Tabelle 4.14: Ergebnisse aus Test 10

Bei Vergleich Nr. 11 finden beide Maße ihr Minimum an benachbarten Bildpunkten, erkennen also nicht exakt das gleiche Pixel. Nach einer rein optischen Beurteilung liegt das RGB-Maß hier richtig. Der insgesamte Verlauf der Differenzwerte ist hier noch ähnlich, wobei es für das Grauwert-Maß hier im Vergleich mehr kleine Werte gibt.

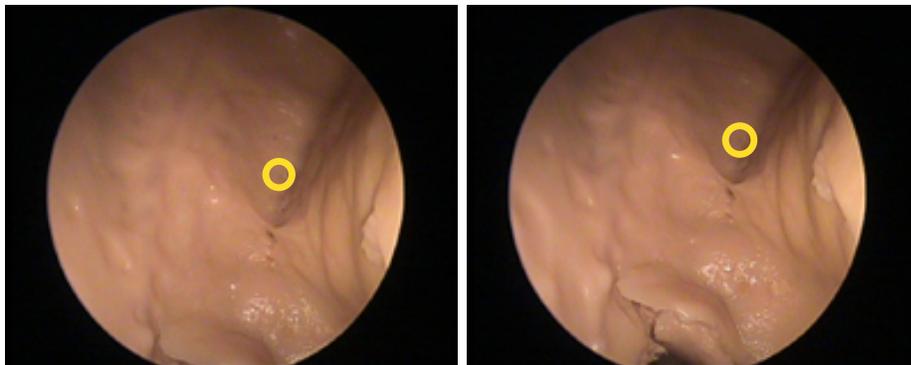


Abbildung 4.29: Testbilder zu Vergleich 11, zeitlicher Versatz 20 Frames

	Δ_{min}	MW	SD
RGB	30,5	219,5	23,6
GW	0	29,2	6,0

Tabelle 4.15: Ergebnisse aus Test 11

Betrachtet man bei Vergleich Nr. 12 die Differenzwerte so fällt auf, dass diese bereits sehr unterschiedlich sind. Das Grauwert-Maß gibt hier sehr viele kleine Differenzen aus, was sich auch im Differenzmittelwert

zeigt. Dieser ist sehr stark abgesunken. Den Minimalwert gibt das Grauwert-Maß hier für drei Stellen an, zwei davon links und rechts neben dem Punkt, für den das RGB-Maß das Minimum angibt und einen mehrere Pixel davon entfernt.

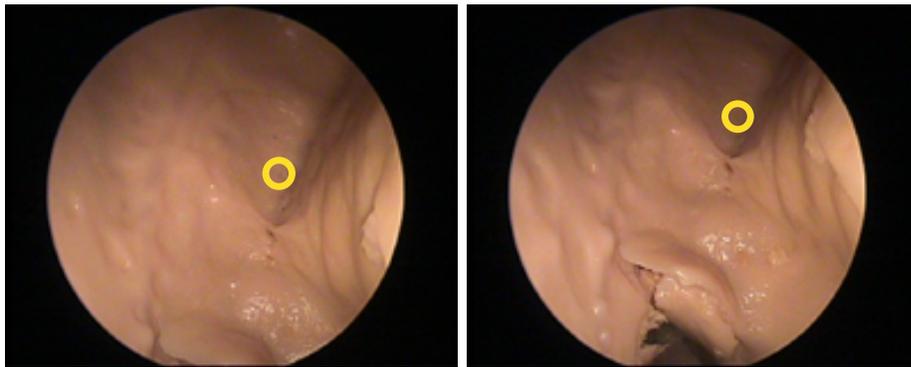


Abbildung 4.30: Testbilder zu Vergleich 12, zeitlicher Versatz 30 Frames

	Δ_{min}	MW	SD
RGB	120,4	210,0	20,7
GW	2	13,0	4,2

Tabelle 4.16: Ergebnisse aus Test 12

Die Ergebnisse von RGB- und Grauwertverarbeitung sind für den 13. Vergleich völlig unterschiedlich, wie in Abbildung 4.31 zu sehen ist. Nur das RGB-Maß erkennt hier noch den richtigen Bildpunkt und das auch eindeutig. Für das Grauwert-Maß ist der Mittelwert noch weiter abgesunken. Es gibt sehr viele kleine Werte, allein der Minimalwert wird für sechs Bildpunkte festgestellt.

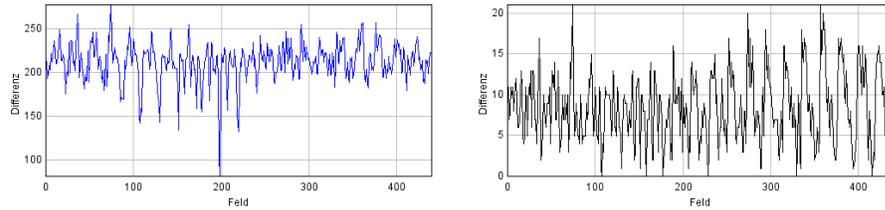


Abbildung 4.31: Differenzwert aus Vergleich 13, RGB(links) u. Grauwerte

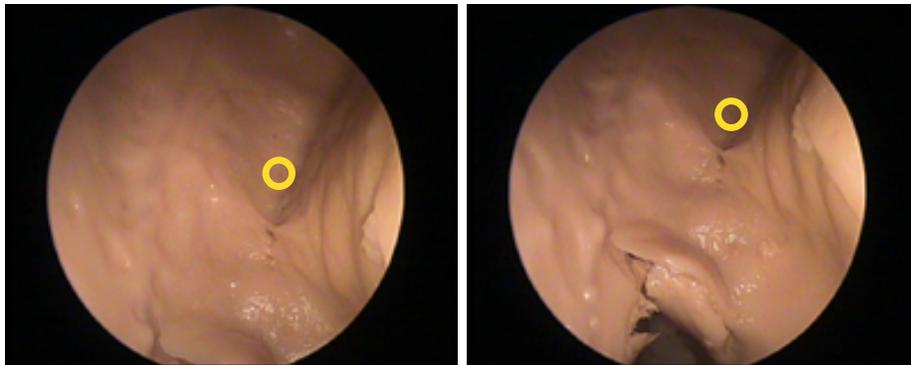


Abbildung 4.32: Testbilder zu Vergleich 13, zeitlicher Versatz 40 Frames

	Δ_{min}	MW	SD
RGB	81,1	212,4	22,0
GW	0	8,5	4,3

Tabelle 4.17: Ergebnisse aus Test 13

Bei Vergleich Nr. 14 ist mit dem Grauwertmaß keine eindeutige Zuordnung der Pixel möglich. Der Mittelwert der Differenzen ist hier auch sehr stark abgesunken, es werden über die gesamte betrachtete Fläche kleine Differenzwerte ausgegeben. Für das RGB-Maß ist der Mittelwert der Differenzen konstant geblieben, es gibt nachwievor nur einen Minimalwert. Jedoch gibt es auch hier mehrere kleine Werte.

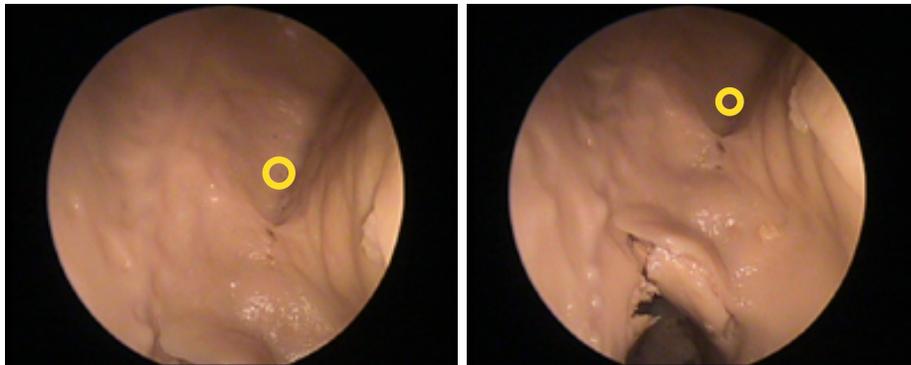


Abbildung 4.33: Testbilder zu Vergleich 14, zeitlicher Versatz 50 Frames

Verglichen mit einer rein optischen Beurteilung findet auch das RGB-Maß nicht den dem Referenzpixel entsprechenden Bildpunkt. Das mit dem bloßen Auge als richtig erkannte Pixel kommt erst an neunter Stelle der kleinen Differenzen. Betrachtet man die einzelnen Differenzen der Komponenten, so zeigt sich, dass an dieser Stelle nur die Komponente $B_{log} - G_{log}$ einen hohen Wert aufweist. Eine Untersuchung der Farbauszüge, der Testbilder lässt darauf schliessen, dass der Blaukanal stark verrauscht ist. Vermutlich führt dieses Rauschen im hier betrachteten dunklen Bildbereich dazu, dass das entsprechende Pixel nicht mehr korrekt erkannt werden kann. Um diese Annahme zu überprüfen wird der Vergleich erneut durchgeführt, allerdings ohne den Blaukanal für die Berechnungen zu verwenden. Jetzt wird das richtige Pixel erkannt. Der

Mittelwert der Differenzen ist zwar abgesunken, aber insgesamt liefert diese erneute Messung deutlich weniger Werte in Nähe des Minimums bei den RGB-Differenzen (s. Abbildung 4.34).

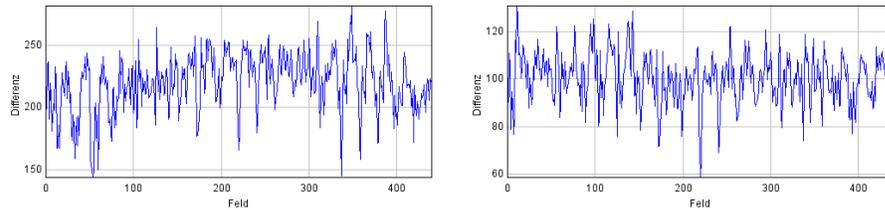


Abbildung 4.34: RGB-Differenzen aus Test 14 *mit* Verwendung des Blaukanals(links) und *ohne*.

	Δ_{min}	MW	SD
RGB	58,5	100,7	10,4
GW	0	4,4	2,9

Tabelle 4.18:
Ergebnisse aus Test 14 ohne Verwendung des Blaukanals

4.6.4 Vergleich unspezifischer Pixel

Bisher wurden bei den Vergleichen als Referenz stets Pixel verwendet, die sich auch mit bloßem Auge gut innerhalb einer Sequenz wiederauffinden ließen. Anders wäre auch eine Beurteilung der Treffsicherheit beider Maße nicht möglich gewesen. Der Vollständigkeit halber wird an dieser Stelle aber noch ein weiterer Vergleich (Vergleich 15) angeschlossen. Diesmal wird kein herausragendes Pixel als Referenz verwendet. Stattdessen wird versucht, ungefähr die entsprechenden Stellen innerhalb einer annähernd

homogenen Fläche in den Vergleichsbildern für den Test anzuwählen. Die Ergebnisse fallen weit weniger eindeutig aus, als das bei den bisherigen Vergleichen der Fall war. Die Betrachtung der Komponenten für das RGB-Maß zeigt, das aber auch hier eine Unterscheidung der einzelnen Pixel noch möglich ist. Abbildung 4.35 zeigt die Differenzen für die einzelnen Komponenten aus Vergleich 15 in der Reihenfolge $I_{log} - I_{quer}$, $B_{log} - G_{quer}$, $R_{log} - G_{quer}$.

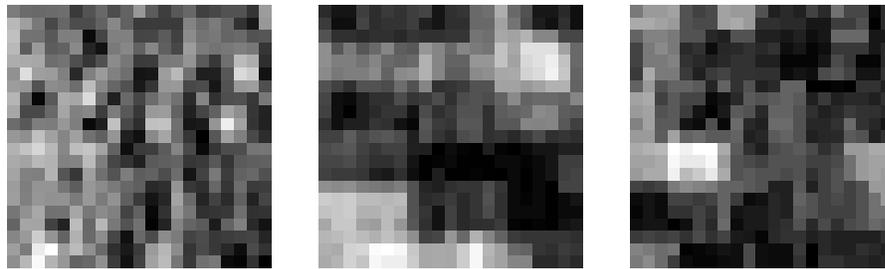


Abbildung 4.35: Differenzwerte der Komponenten bei Vergleich 15

Ob eines der beiden Maße bei diesem Vergleich die minimale Differenz an der richtigen Stelle anzeigt, kann allerdings hier nicht geklärt werden.

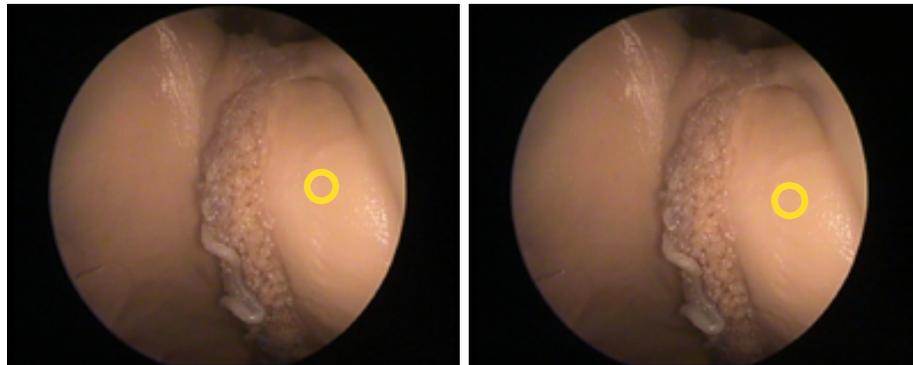


Abbildung 4.36: Testbilder zu Vergleich 15

	Δ_{min}	MW	SD
RGB	1,7	10,4	5,4
GW	2	3,0	2,3

Tabelle 4.19: Ergebnisse aus Test 15

4.7 Das verwendete Videomaterial

Die in dieser Arbeit verwendeten Testbilder sind endoskopischen Videosequenzen entnommen. Hierbei mussten gewisse qualitative Einschränkungen gemacht werden. An dieser Stelle soll daher kurz auf den Weg der Bilddaten von der Kamera bis zu den Testbildern eingegangen werden.

Die hier verwendete Endoskopkamera liefert Bilder im Digital Video (DV) Format. Das Gerät selbst ist allerdings nur zur Darstellung der Bilder auf einem Monitor gedacht und besitzt keine Aufzeichnungsmöglichkeit. Zu diesem Zweck kam eine weitere DV-Kamera zum Einsatz, wobei beide Geräte über ein S-Video-Kabel verbunden wurden. Bis die Daten auf das Videoband gelangten, wurden sie also je einmal D/A und wieder A/D gewandelt. Vom Band wurden die Daten dann auf einen PC übertragen und im AVI (Audio Video Interleave) Containerformat abgelegt¹⁰. Aus den AVI-Dateien wurden dann die Einzelbilder extrahiert.

Das Videomaterial wurde im Format DV PAL 50i aufgezeichnet, also im Halbbildverfahren. Zur Berechnung der Einzelbilder wurde daher ein Deinterlacing verwendet, um die Bildung einer Zeilenstruktur zu vermeiden. Dabei wurden nur die unteren Halbbilder verwendet und die fehlenden Zeilen durch Interpolation errechnet. Dieser Vorgang bedeutet eine Manipulation der Bilddaten, die sich auch einschränkend auf die Wieder-

¹⁰Es wurde der MS DV AVI Codec verwendet.

auffindbarkeit eines einzelnen Pixels auswirken kann.

Weiterhin fiel bei der Auswertung des Bildmaterials auf, dass dieses relativ stark verrauscht ist. Insbesondere der Blaukanal ist hiervon betroffen.

Abbildung 4.37 zeigt die Farbkanäle eines Testbildes.

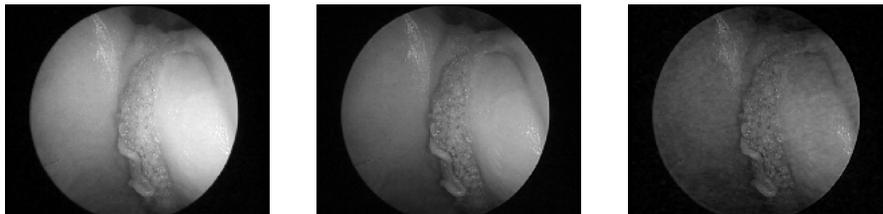


Abbildung 4.37: einzelne Farbkanäle (R G B) eines Testbildes

Die Betrachtung einer ganzen Sequenz an einem Videomonitor mit Blue-Only-Funktion¹¹ zeigte, dass es sich bei den sichtbaren Mustern tatsächlich um Rauschen und nicht etwa um Strukturen im Bildinhalt handelt. Im Abschnitt 4.6.3 wurde dieser Punkt bereits angesprochen.

Ein direkter Vergleich der AVI-Dateien mit dem DV-Band ließ keinen merklichen Qualitätsunterschied erkennen. Die nicht optimale Bildqualität ist also einerseits sicherlich auf die Digital/Analog Wandlung des Materials zurückzuführen, zum anderen aber womöglich auch in der Kamerahardware begründet. Die erwarteten Eigenschaften des hier untersuchten Maßes ließen sich jedoch auch mit dem vorhandenen Material nachweisen, zumal sich das Rauschen wie bereits erwähnt erst in sehr dunklen Bildbereichen bemerkbar machte. Es soll hier dennoch darauf hingewiesen werden, dass die Testergebnisse auch im Hinblick auf die genannten Einschränkungen betrachtet werden sollten.

¹¹Bei eingeschalteter Funktion wird nur der Blaukanal wiedergegeben.

Kapitel 5

Auswertung

In dieser Arbeit wurde ein neu entwickeltes Pixelvergleichsmaß vorgestellt. Dieses Maß wertet die Farbinformation eines Bildes aus, um ein Pixel eindeutig identifizieren zu können (s. Abschnitt 3.1). Dabei werden zum einen die zahlenmäßigen Verhältnisse der Farbkanäle betrachtet und zum anderen die punktuelle Helligkeit eines Bildpunktes in Relation zu seiner Umgebungshelligkeit gesetzt.

In den vorangegangenen Tests wurde das hier vorgestellte RGB-Maß mit einer einfachen Grauwertnorm verglichen. Anhand einer Reihe von Bildern wurde überprüft, wie gut sich ein bestimmtes Pixel innerhalb einer Sequenz wiederfinden lässt. Dabei sollte speziell untersucht werden, ob die Verwendung des neuen Maßes von Vorteil ist, wenn ein Pixel unter stark unterschiedlichen Beleuchtungsbedingungen betrachtet wird. Die Annahme, dass dem so ist, konnte hier bestätigt werden.

Beim Vergleich von ähnlichen Bildern waren beide Maße in der Lage ein Pixel eindeutig zu identifizieren. Insgesamt war das Ausmaß der räumlichen Verschiebung allein nicht ausschlaggebend für die Qualität der Ergebnisse. Stattdessen führte, wie erwartet, eine Veränderung der

Beleuchtungssituation das Grauwertmaß rasch an seine Grenzen, wobei das RGB-Maß hier noch gute Ergebnisse liefern konnte. Wie sich bereits im Vorfeld abzeichnete, spielte dabei die Komponente $I_{log} - I_{quer}$ eine wichtige Rolle.

Das Grauwert-Maß ist bei der Identifizierung von Pixeln an die absoluten Werte der Farbkanäle gebunden. Nur wenn diese für verglichene Pixel nah beieinander liegen, können niedrige Differenzwerte ausgegeben werden. Hier stellt sich ein zweifaches Problem. Zum einen wird ein niedriger Differenzwert auch angegeben, wenn sich die Pixel lediglich in der Summe ähneln. Das bedeutet, dass also auch unähnliche Pixel bei entsprechender Kombination der Farbwerte als ähnlich erkannt werden. Zum anderen führt eine Variation der Beleuchtung auch zu veränderten Werten für die Farbkanäle. Das Grauwert-Maß kann dann keine Übereinstimmung mehr feststellen, wenn die betrachtete Vergleichsregion wesentlich heller oder dunkler ist als der Bereich, in dem der Referenzbildpunkt liegt. In den Tests zeigt sich dies daran, dass die Ergebnisse die das Grauwert-Maß lieferte bei Zunahme der Beleuchtungsveränderung immer weniger differenziert wurden. Die Zahl der kleinen Differenzwerte nahm dann stetig zu, was sich auch am kontinuierlich sinkenden Differenzmittelwert ablesen lässt. Es konnte also kein Pixel mehr eindeutig dem Referenzpixel zugeordnet werden. Dass in die Differenzwerte des RGB-Maßes neben dem Verhältnis der Farbkanäle auch die Komponente $I_{log} - I_{quer}$ eingeht ist nun ein klarer Vorteil. Einerseits konnten Pixel mit übereinstimmenden Werten der Farbkanäle mithilfe dieser Größe klar unterschieden werden. Andererseits konnte auch bei starken Beleuchtungsunterschieden ein Pixel somit immernoch über das Verhältnis seiner Helligkeit relativ zur Umgebungshelligkeit erkannt werden. Also auch selbst dann, wenn sich die Verhältnisse der RGB-Werte verändert hatten.

Letztlich ist es aber die Kombination der verschiedenen Komponenten,

die die Stärke des RGB-Maßes ausmacht. Ein Pixel wird durch ihre Verwendung sehr genau beschrieben. Ein entscheidendes Merkmal des neuen Maßes ist also die Eindeutigkeit der Ergebnisse.

Betrachtet wurde in den durchgeführten Tests stets das Minimum der Vergleichsregion. Hiermit konnte zuverlässig das korrespondierende Bildelement bestimmt werden. Auffällig war dabei, dass die Differenzwerte für das Minimum mitunter deutlich anstiegen. Dies ist zum Teil auf Rauschen zurückzuführen, das die RGB-Werte veränderte, aber auch eine Folge der sich von Bild zu Bild leicht veränderten Perspektive innerhalb einer Sequenz. Trotzdem konnte das RGB-Maß zuverlässig ein eindeutiges Minimum bestimmen.

Um objektiv beurteilen zu können, inwieweit die Maße ein Pixel eindeutig zuordnen können, wurde als Referenz stets ein Pixel gewählt, das mit bloßem Auge gut erkennbar und in konsekutiven Frames wiederauffindbar war. Dieser Punkt muss hervorgehoben werden, wenn es um die Grenzen des neuen Maßes geht. Ein sich von seiner Umgebung deutlich abhebendes Bildelement liefert ideale Bedingungen für die Überprüfung der Eigenschaften des neuen Maßes. Soll ein einzelner Bildpunkt, der Teil einer annähernd homogenen Fläche ist, innerhalb einer Sequenz wiedergefunden werden, sind die Ergebnisse nicht ebenso deutlich. Auch hierbei werden jedoch die einzelnen Pixel noch voneinander abgegrenzt, was bei reiner Grauwertbetrachtung so nicht möglich ist.

Kapitel 6

Fazit und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein neu entwickeltes Pixelvergleichsmaß vorgestellt und untersucht. Es wurde erwartet, dass aufgrund der gezielten Verarbeitung der Farbinformation eines Bildes ein Bildelement auch unter schwierigen Beleuchtungsverhältnissen wiederauffindbar sein sollte. Die theoretischen Grundlagen, auf denen diese Annahme basiert, wurden dargestellt und anschließend die tatsächlichen Eigenschaften in Tests mit endoskopischem Bildmaterial untersucht. Dabei wurde das neue Maß mit einer einfachen Grauwert-Norm verglichen.

Die Ergebnisse zeigen, dass das neue Maß die erwarteten Eigenschaften aufweist und die dabei vorgenommene Farbverarbeitung einer reinen Grauwertbetrachtung überlegen ist. Im direkten Vergleich war mit dem RGB-Maß eine weitaus differenziertere Auswertung der betrachteten Bildinhalte möglich.

Den Anstoß zu dieser Arbeit lieferte die Entwicklung eines Image-Mosaicing-Werkzeugs mit dessen Hilfe vollautomatisch Übersichtsbilder aus endoskopischen Aufnahmen erzeugt werden können sollen([KBS07], [Nad07], [Zim08]). Beleuchtungsunterschiede sind dabei oftmals ein Hin-

dernis, da bisher bei der Registrierung eine reine Grauwertverarbeitung stattfand. Insofern sind die hier gefundenen Ergebnisse vielversprechend in Bezug auf die Weiterentwicklung der Mosaicing-Software. Ein Systemtest wäre eine sinnvolle Weiterführung der bereits durchgeführten Untersuchungen. Dabei sollten sicherlich auch weitere Neuerungen in diesem Bereich miteinbezogen werden. So steht mit der Eye-Max-Kamera¹ der Firma *Wolf* bereits ein System zur Verfügung, das hinsichtlich Bildqualität sicherlich einige Verbesserungen bringen wird. Auch das neue Format *Medical HD*² wird hier zu deutlichen Verbesserungen führen.

Schließlich ist es noch ein wichtiger Punkt, den Framegrabber in der Mosaicing-Software mit einer Deinterlacing-Funktion zu versehen. Unter Berücksichtigung der genannten Aspekte und Neuerungen wird dann das neue Maß in der Praxis auf seine Tauglichkeit untersucht werden müssen, nachdem es sich hier bereits in allgemeinen Tests bewährt hat.

¹Produktbeschreibung auf www.richard-wolf.com

²Bildseitenverhältnis 5:4, Auflösung 1280*1024 SXGA

Literaturverzeichnis

- [BB06] W. Burger and M. J. Burge. *Digitale Bildverarbeitung. Eine Einführung mit Java und ImageJ*. x media press, Springer Verlag, 2006.
- [Jäh02] Bernd Jähne. *Digitale Bildverarbeitung*. Springer-Verlag, 2002.
- [KBS07] Wolfgang Konen, Beate Breiderhoff, and Martin Scholz. Real-time image mosaicing for endoscopic video sequences. Technical report, Fachhochschule Köln, 2007.
- [KKHM99] Masukatsu Kouroggi, Tukeshi Kurutut, Jun'achi Hoshinot, and Yoichi Mumoka. Real-time image mosaicing from a video sequence. *Procs ICIP99*, 4:133–137, 1999.
- [KST98] W. Konen, M. Scholz, and S. Tombrock. The VN-Project: Endoscopic Image Processing for Neurosurgery. *Computer Aided Surgery*, 3:144–148, 1998.
- [LDH03] Le Lu, Xiang-Tian Dai, and Gregory Hager. Real-time Video Mosaicing with Adaptive Parametric Warping. Technical report, Computational Interaction and Robotics Lab Computer

Science Department the Johns Hopkins University Baltimore, 2003.

- [Mar87] Jost J. Marchesi. *Photokollegium, Teil 3*. Verlag Photographie AG, 1987.
- [Nad07] Martin Naderi. Implementierung eines Echtzeitverfahrens zur Erstellung von Bildmosaiken aus endoskopischen Videosequenzen, 2007.
- [Str05] Tilo Strutz. *Bilddatenkompression*. Vieweg, 2005.
- [Sze94] Richard Szeliski. Image Mosaicing for Tele-Reality Applications. Technical report, Digital Equipment Corporation Cambridge Research Lab, 1994.
- [Zim08] Christian Zimmermann. Implementierung einer Benutzerschnittstelle zur medizinischen Evaluierung eines Image Mosaicing-Verfahrens in der Endoskopie, 2008.