

Hochschule Neubrandenburg  
Studiengang Geoinformatik

**Vorbereitende Untersuchungen zur  
Handhabung und Kalibrierung der  
Hyperspektralkamera „HS-CL-30-V10E“  
mit Schwerpunkt auf der räumlichen und  
spektralen Auflösung sowie dem  
Datenfluss zu weiterverarbeitenden  
Systemen**

**Bachelorarbeit**

vorgelegt von: Martin Kanning

17. Juli 2011

Zum Erlangen des akademischen Grades  
„Bachelor of Engineering“ (B.Eng.)

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Kresse

Zweitprüfer: Prof. Dr.-Ing. Ernst Heil

Bearbeitungszeitraum: 23.5.2011 bis 22.07.2011

URN: nbn:de:gbv:519-thesis2011-0072-4

## **Zusammenfassung**

Diese Arbeit beschäftigt sich nach einer kurzen Einführung in die hyperspektrale Fernerkundung mit der Beschreibung der technischen Eigenschaften und dem Aufbau der Hyperspektralkamera „HS-CL-30-V10E“ sowie der zur Datenerfassung und Auswertung erforderlichen Softwarepakete. Außerdem werden alle durchgeführten Arbeitsschritte zur optimalen Einrichtung der Hyperspektralkamera erläutert. Anschließend werden verschiedene Aufnahmesituationen durch unterschiedliche Beleuchtungstypen aufgezeigt, welche die korrekte Wiedergabe der erwarteten Spektrallinien durch das Gerät beweisen. Weiterhin wurden verschiedene Objekte mit der jeweiligen Beleuchtung aufgezeichnet und die Qualität der dabei erzeugten Ergebnisse bewertet. Darauf folgen erste Versuche zur Nachbereitung der Aufnahmen hinsichtlich der Befreiung von Beleuchtungseinflüssen und der Klassifizierung von Objekten. Abschließend bietet diese Arbeit einige Empfehlungen zur Durchführung eigener Messungen.

After a short introduction to hyperspectral remote sensing this text continues with the description of the technical characteristics, the structure of the hyperspectral camera „HS-CL-30-V10E“ and the necessary data capture and analysis software packages. In addition, all performed steps for setting up the optimal camera configuration will be explained. Then, different shooting situations with several types of lighting are presented that prove the correct reproduction of the expected spectral lines. Furthermore, various objects were recorded with the different types of lighting and evaluated by the quality of the results. After that the first postprocessing experiments for exemption of illumination conditions and the classification of objects will be described. In conclusion, this text offers some recommendations to conduct own measurements.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen der hyperspektralen Fernerkundung</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Hardware</b>	<b>4</b>
3.1	Kamera . . . . .	5
3.1.1	Spektrometer „IMSpector V10E“ . . . . .	5
3.1.2	Objektiv . . . . .	6
3.1.3	Sensor „IMPERX IPX-2M30-L“ . . . . .	6
3.2	Zusätzliche Vorrichtungen zur Verwendung der Kamera . . . . .	7
3.2.1	Rahmen . . . . .	7
3.2.2	Beleuchtung . . . . .	7
3.2.3	Objekttisch . . . . .	7
3.2.4	Drehbarer Stativaufsatz . . . . .	8
3.2.5	Schnittstellen . . . . .	9
3.2.6	Frame Grabber . . . . .	10
<b>4</b>	<b>Software</b>	<b>11</b>
4.1	Voreinstellungen mit „Lynx Configurator“ . . . . .	11
4.2	Aufnahme mit „SpectralDAQ“ . . . . .	11
4.2.1	Konfigurationsleiste . . . . .	12
4.2.2	Ansichtsfenster . . . . .	12
4.2.3	Aufnahme von Daten . . . . .	14
4.2.4	Aufbau der Ergebnisdaten . . . . .	14
4.3	Auswertung mit „ENVI“ . . . . .	15
4.3.1	Darstellung von Bildern und Spektren . . . . .	15
4.3.2	Vergleich von Spektren . . . . .	16
4.3.3	Rechnungen mit Spektren . . . . .	16
4.3.4	Klassifizierung . . . . .	17
4.3.5	Erzeugung von Datenwürfeln . . . . .	18
<b>5</b>	<b>Messungen</b>	<b>20</b>
5.1	Vorbereitungen . . . . .	20
5.1.1	Fokussierung . . . . .	20
5.1.2	Dunkel- und Hellbildkalibrierung . . . . .	21
5.1.3	Bestimmung des optimalen Beleuchtungsabstands . . . . .	22

5.1.4	Betriebstemperaturen . . . . .	24
5.1.5	Bildrate, Belichtungszeit und Fahrgeschwindigkeit . . . . .	25
5.2	Aufnahmen bei unterschiedlichen Beleuchtungen . . . . .	26
5.2.1	Halogenlampen . . . . .	27
5.2.2	Tageslicht . . . . .	29
5.2.3	Neonlicht . . . . .	30
5.2.4	Infrarotlampe . . . . .	32
5.2.5	Fazit . . . . .	33
5.3	Befreiung von Beleuchtungseinflüssen und Klassifizierung . . . . .	33
<b>6</b>	<b>Empfehlungen für die Durchführung von Messungen</b>	<b>38</b>
<b>7</b>	<b>Fazit</b>	<b>39</b>
<b>8</b>	<b>Ausblick</b>	<b>39</b>
8.1	White-Reference-Ringversuch der DGPF . . . . .	40



# 1 Einleitung

Die hyperspektrale Fernerkundung wird vermehrt Einzug in die verschiedensten Geschäftsbereiche von der Industrie bis hin zur satellitengestützten Fernerkundung erhalten. Die Hochschule Neubrandenburg ist seit einiger Zeit ebenfalls Besitzer einer Hyperspektralkamera.

Ziel dieser Arbeit ist es, einen Überblick über die verwendeten Hardwarekomponenten dieses Gerätes, deren Eigenschaften und Funktionsweisen sowie deren Zusammenhänge untereinander zu erarbeiten. Weiterhin werden Analysen zur korrekten Handhabung und Einstellung des Gerätes erläutert werden. Dazu gehören vorzunehmende Vorkonfigurationen sowie die Beschreibung und Handhabung der verwendeten Konfigurations- und Aufnahmeprogramme sowie des Programms zur Nachbereitung der erzeugten Aufnahmen. Außerdem werden Untersuchungen zu den idealen Aufnahmebedingungen aufgezeigt, insbesondere die Einflüsse unterschiedlicher Beleuchtungen auf die Messergebnisse. Anschließend werden diese Ergebnisse untersucht und deren Qualität bewertet. Abschließend folgen außerdem erste Versuche der automatischen Klassifizierung von Objekten sowie einige Empfehlungen für die Durchführungen eigener Messungen.

## 2 Grundlagen der hyperspektralen Fernerkundung

Die hyperspektrale Fernerkundung kombiniert die Disziplinen der Spektroskopie und der Digitalfotografie. Jede mit Hilfe eines Kamerasensors aufgenommene Bildinformation (Pixel) wird dabei zusätzlich mit Informationen über den Aufbau des vom Aufnahmeobjekt reflektierten Lichts versehen, welche von einem Spektrometer erzeugt werden. Zunächst sorgt dazu ein Objektiv für die optimale Bündelung des einfallenden Lichtes, welches anschließend durch einen kleinen Spalt zum Spektrometer geleitet wird. Das Spektrometer zerlegt nun mit Hilfe einer bestimmten Anordnung von Linsen, Prismen und Spiegeln das Licht in einzelne Bestandteile. Diese Bestandteile des Lichtes werden schließlich auf einen Sensor projiziert. Für jedes aufgespaltete Lichtelement existiert pro räumlichem Pixel ein eigener Sensor (Abbildung 1). Anhand der spektralen Informationen ist es anschließend möglich die aufgenommenen Objekte zu klassifizieren.

Die spektrale Abtastung beschreibt, wie fein die Zerlegung des Lichtes erfolgt, wie viele Messungen im vorliegenden Spektrum also durchgeführt werden können. Der Bereich des Spektrums, der pro Messung abgedeckt werden kann, wird als „Band“ bezeichnet. Je nach Gerät sind bei der hyperspektralen Fernerkundung Abtastraten von bis zu  $0,01 \mu\text{m}$  möglich und decken dabei Wellenlängen von circa  $0,4 \text{ nm}$  bis  $2,4 \text{ nm}$  ab [1]. Dieser hohe Detailgrad ist der entscheidende Unterschied gegenüber der multispektralen Fernerkundung, bei der nur wenige fixe Bereiche des Spektrums aufgezeichnet werden. Dies steigert den Informationswert gegenüber der multispektralen Fernerkundung enorm, da somit auch Objekte, welche sehr ähnliche Reflexionseigenschaften besitzen, unterschieden und klassifiziert werden können.

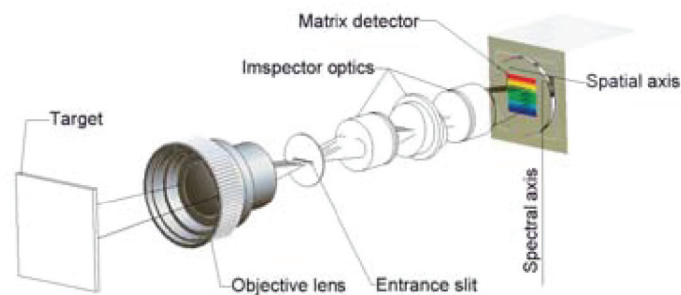


Abbildung 1: Grundaufbau von Hyperspektralkameras [2]

Die Aufnahme einer einzigen Zeile erzeugt pro räumlichem Pixel eine große Anzahl von

spektralen Informationen, welche man sich als übereinander gestapelt vorstellen kann. Mit Voranschreiten der Aufnahmezeit werden mehrere solcher Zeilen erzeugt und es entsteht ein so genannter Datenwürfel (Abbildung 2).

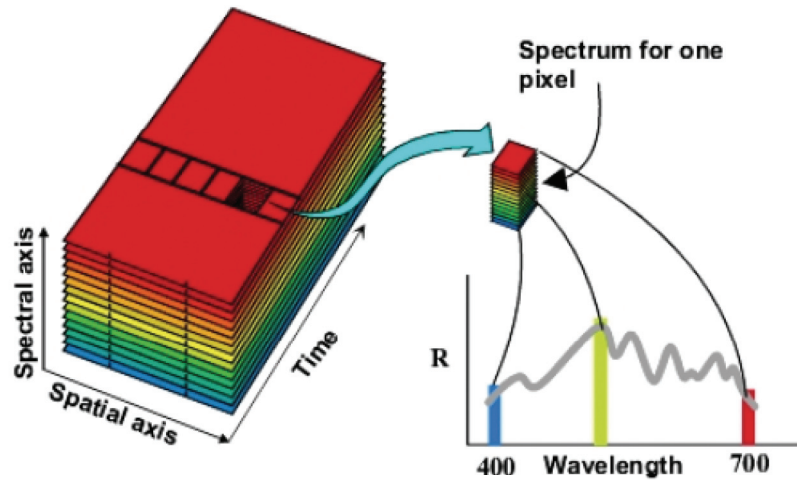


Abbildung 2: Datenaufbau [2]

### 3 Hardware

Dieses Kapitel befasst sich mit der Beschreibung aller Hardwarekomponenten der Messvorrichtung. Dazu gehören die Kamera selbst und seine einzelnen Komponenten sowie alle unterstützende Geräte zur Realisierung des vorliegenden Aufbaus.

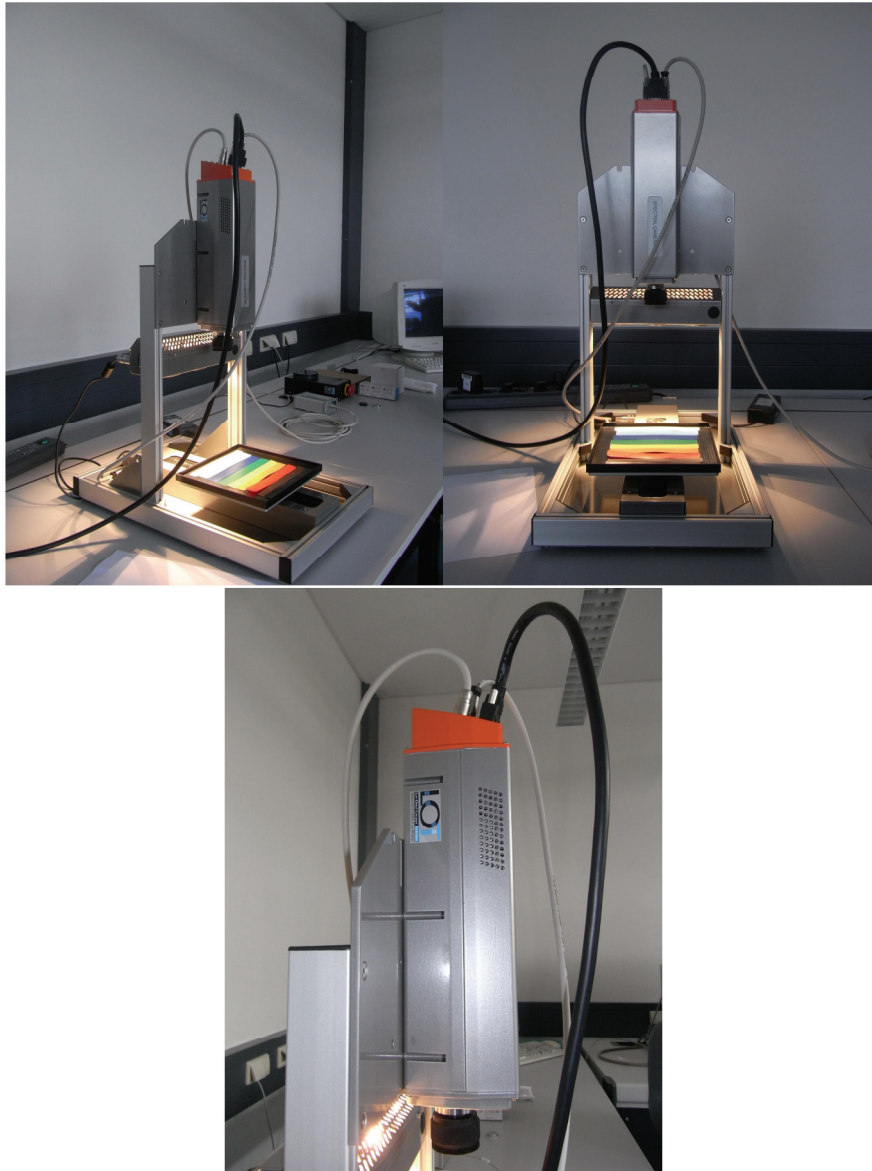


Abbildung 3: Kameraaufbau

### 3.1 Kamera

Die VNIR Hyperspektralkamera der Hochschule Neubrandenburg ist vom Typ „HS-CL-30-V10E“ der finnischen Firma Specim (Abbildung 4). Hierbei handelt es sich um eine CCD Zeilenkamera „IMPERX IPX-2M30-L“ kombiniert mit einem Spektrometer vom Typ „IMSpector V10E“. Beide Geräte sind gemeinsam in einem Metallgehäuse von 330 x 85 x 90 mm verbaut. Die optimale Außentemperatur für den Betrieb liegt zwischen 5 °C und 40 °C. Bei der Lagerung des Gerätes gelten Temperaturen zwischen -20 °C und 50 °C als tolerierbar [2].

Im Folgenden werden die technische Eigenschaften und Besonderheiten der einzelnen Komponenten des Gerätes näher erläutert.



Abbildung 4: Hyperspektralkamera „HS“ mit und ohne Gehäuse[7]

#### 3.1.1 Spektrometer „IMSpector V10E“

Das verwendete Spektrometer deckt ein Spektrum von 400 nm bis 1000 nm ab. Es bricht das eingefallene Licht in 848 Bänder auf; die Breite eines einzelnen Bandes beträgt somit etwa 0,71 nm. Diese kann mit Hilfe von so genanntem *spektralem Binning* auf bis zu 5,8 nm erhöht werden. Beim Binning werden wahlweise zwei, vier oder acht spektrale Bänder zu einem einzigen zusammengefasst.

Der Spalt am Spektrometereingang hat eine Breite von 11,84 mm und eine Höhe von 30 µm. Dies sorgt für eine spektrale Auflösung von 2,8 nm. Generell gilt dabei, je kleiner der Spalt, desto höher die spektrale Auflösung. Dabei verringert sich allerdings die Menge an Energie am Sensor und der Aufnahmebereich [6]. Laut Hersteller weist das Gerät keinerlei signifikanten Abbildungsfehler auf [7].

### 3.1.2 Objektiv

Bei dem verwendeten Objektiv handelt es sich um das „OLE23“ der Firma Specim (Abbildung 5). Es hat eine feste Brennweite von 23 mm und eine ebenfalls feste Blendenzahl von 2,4. Die maximal mit diesem Objektiv mögliche räumliche Ausdehnung eines Bildes beträgt 14,4 mm. Die Strahlen verlassen das Objektiv *telezentrisch*, das heisst die Strahlen sind parallelisiert. Die Lichtdurchlässigkeit liegt bei über 85 %. Das Gerät besteht aus eloxiertem Aluminium und ist 43 mm lang und 41 mm breit im Durchmesser. Standardmäßig ist das „OLE23“ nur für Objektstände von mindestens 50 cm vorgesehen. Der verwendete optische Erweiterungsring ermöglicht aber auch Abstände von bis zu 10 cm. [8]



Abbildung 5: Objektiv OLE23 [8]

### 3.1.3 Sensor „IMPERX IPX-2M30-L“

Der Sensor der Hyperspektralkamera funktioniert nach dem Interline-CCD-Zeilensensor-Prinzip, das heisst es gibt zwei getrennte Flächen für die Aufnahme und den Abtransport der Informationen. Damit kann schon während des Abtransports mit der Aufnahme neuer Informationen begonnen werden. Der Sensor ist in der Lage 1600 räumliche und 848 spektrale Pixel pro Zeile zu speichern. Ein Pixel hat dabei eine Breite von 7,4  $\mu\text{m}$ .

Das Gerät wendet beim Abtransport zusätzlich zweifaches Multi Tapping an. Das bedeutet, dass das Schieberegister in der Mitte geteilt ist und die Informationen an zwei separate A/D-Wandler weitergereicht werden. Dies dient vor allem zur Verringerung der Verarbeitungszeiten, da bei den Aufnahmen oftmals große Datenmengen in kurzer Zeit verarbeitet werden müssen [9]. Die beiden A/D-Wandler geben das gewandelte Signal mit einer Bittiefe von 12 Bit aus, was einer Abstufung von 4096 Grauwerten entspricht. Die minimale Bildrate liegt bei 33 Hz, wenn der vollständige räumliche und spektrale



Aufnahmebereich (*Full Frame*) genutzt wird. Wenn der Aufnahmebereich durch räumliches und spektrales Binning vorher eingeschränkt wird, beträgt die maximale Bildrate 120 Hz. Die Belichtungszeiten können zwischen 0,1 und 100 ms liegen. Bildrate und Belichtungszeit können mit Hilfe der Aufnahmesoftware gesteuert werden.

## **3.2 Zusätzliche Vorrichtungen zur Verwendung der Kamera**

### **3.2.1 Rahmen**

Grundlegend besteht der Rahmen aus Metallstreben mit Führungsschienen. Ein horizontales Rechteck aus vier Streben bildet die Bodenebene an der von unten zur zusätzlichen Stabilität eine Bodenplatte befestigt ist. Innerhalb dieses Rechteckes befindet sich die Fahrschiene für den Objektisch. Etwa in der Mitte der längeren Seiten des Rechteckes führen zwei Streben vertikal aufwärts. Zur Verbesserung der Stabilität sind der horizontale und der vertikale Teil mit Winkeln versehen. Zwischen den vertikalen Streben befinden sich Beleuchtung und Kamera. Durch die Führungsschienen kann der Abstand von Kamera und Beleuchtung zum Objektisch variiert werden. (Abbildung 3)

### **3.2.2 Beleuchtung**

Für die Beleuchtung des Objektisches werden drei nebeneinander angeordnete 12 Volt Niedervolthalogenlampen vom Typ „Accentline“ der Firma Philips eingesetzt. Sie haben einen Ausstrahlungswinkel von 36 Grad. Bei einer Leistung von 35 Watt strahlen diese mit einer Lichtstärke von maximal 3750 Candela und einer Farbtemperatur von 3000 Kelvin, was das Licht in einem warmweißen Farbton erscheinen lässt. Die Halogenlampen besitzen eine 100% echte Farbwiedergabe der beleuchteten Objekte. Mit einer Sockeltemperatur von bis zu 250 Grad Celsius werden die Lampen allerdings sehr heiß [4].

Die Leuchten werden über eine eigene Stromversorgung betrieben und befinden sich in einem Metallgehäuse. An der hinteren, vom Objektisch abgewandten Seite, sorgen zwei kleine Lüftungsanlagen für die Abfuhr von Wärme. Zum Auswechseln der Lampen können diese mit etwas Kraft vorne aus dem Rahmen gezogen werden.

### **3.2.3 Objektisch**

Der Objektisch hat eine quadratische Form mit einer Kantenlänge von 20,4 cm. Die Auflagefläche ist aus schwarzem Plastik und kann - beispielsweise zur Reinigung - abgenommen werden. Wird die Kamera mit dem maximalen Abstand von 28 cm zum Objektisch angebracht, können 12,8 cm des Objektisches tatsächlich für die Aufnahme genutzt

werden. Der Objektisch kann mit Hilfe eines Motors unter der Kamera hin und her bewegt werden. Die Geschwindigkeit mit der sich der Tisch bei Aufnahme und Rückfahrt bewegt, kann per Software geregelt werden. Auch der Fahrbereich wird softwaremäßig eingestellt.

#### **3.2.4 Drehbarer Stativaufsatz**

Die Kamera kann auch auf dem mitgelieferten drehbaren Stativaufsatz montiert werden. Dazu wird zunächst der beiliegende Winkel am Aufsatz befestigt und daran anschließend die Kamera um 90 Grad gekippt angeschraubt (Abbildung 6). Bei der Aufnahme bewegt sich dann die Kamera und nicht das abzulichtende Objekt. Die Steuerung des Gerätes erfolgt über die gleiche Schnittstelle wie bei dem Objektisch. Eine Veränderung der Konfiguration ist bis auf eventuelle Neufokussierung nicht notwendig. Ein Notschalter stoppt in Gefahrensituationen die Kamerabewegung. Durch eine Drehung nach rechts wird die Sicherung des Schalters wieder gelöst.



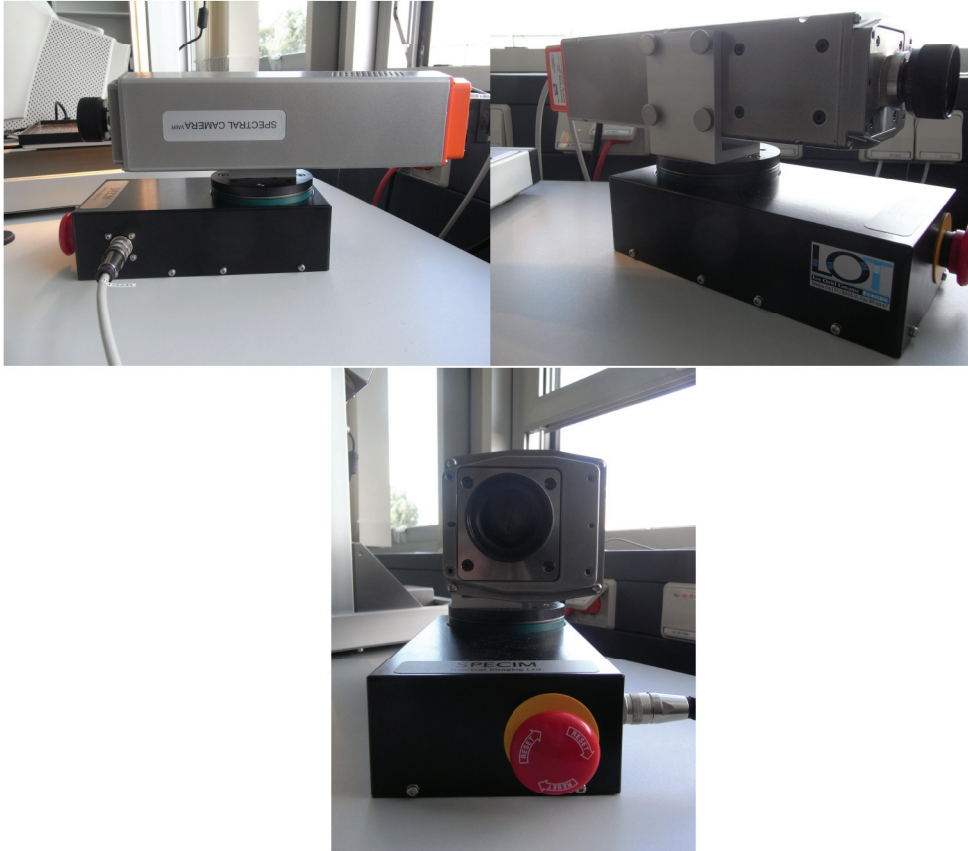


Abbildung 6: Drehbarer Stativaufsatz

### 3.2.5 Schnittstellen

Der Datenfluss erfolgt über die „Camera Link“ Schnittstelle. Hierbei handelt es sich um eine standardisierte High-End-Schnittstelle, welche von der Automated Imaging Association (AIA) - einem Zusammenschluss vieler Firmen dieses Industriezweiges - im Jahre 2000 eingeführt wurde. Standardisiert wurden dabei die verwendeten Übertragungssignale sowie Kabel und Stecker.

Es gibt drei Typen von Übertragungsmöglichkeiten, welche anhand ihrer maximalen Datenrate unterschieden werden können. „Base“ ermöglicht eine Übertragung von 24 Bit pro Takt, „Medium“ ermöglicht 48 Bit pro Takt und „Full“ ermöglicht 64 Bit pro Takt. „Base“ kommt dabei mit einer einzigen Kabelverbindung aus, die beiden anderen benötigen eine zweifache Verkabelung. Die Hyperspektralkamera der Hochschule Neubrandenburg verwendet eine „Base Camera Link“ Schnittstelle. [10]

### 3.2.6 Frame Grabber

Der sogenannte Frame Grabber empfängt die über „Camera Link“ übermittelten Daten und verarbeitet diese weiter. In diesem Fall wird ein Frame Grabber der Firma National Instruments des Typs „PCI NI 1428“ verwendet. Dieser verfügt über eine Taktrate von bis zu 50MHz und einer Datenrate von 100 MB/s [11]. Die Kamera erfasst durch zweifaches Multitapping  $2 * 12$  Bit, also 24 Bit, welche über „Camera Link“ zum Frame Grabber übertragen werden.

## 4 Software

Für die Erzeugung und Weiterverarbeitung der hyperspektralen Aufnahmen werden insgesamt drei verschiedene Programme benötigt. Für die Voreinstellungen des Ausgangssignals der Kamera wird „Lynx Configurator“ verwendet, die Aufnahmen werden mit „SpectralDAQ“ erzeugt und die anschließende Auswertung erfolgt mit „ENVI“. Nachfolgend werden alle benötigten Funktionen der drei Programme beschrieben.

### 4.1 Voreinstellungen mit „Lynx Configurator“

Das Programm „Lynx Configurator“ wurde vom amerikanischen Kamerahersteller Imperx entwickelt und dient zur Konfiguration der hauseigenen Kameras. Es kann nach einer Registrierung auf der Webseite von Imperx kostenlos heruntergeladen werden. Dies ist notwendig, weil „SpectralDAQ“ - das Aufnahmeprogramm von Specim - über keine Möglichkeiten zur Konfiguration der Ausgangssignale verfügt.

Nach dem Start erkennt „Lynx“ automatisch die vorhandenen Ports unter denen auch die installierte Kamera aufgeführt und auswählbar ist. Nun stehen viele Konfigurationsmöglichkeiten wie die Begrenzung des Aufnahmebereichs (AOI), Binning und Veränderung der Belichtungszeit zur Verfügung. Diese Einstellungen lassen sich allerdings größtenteils auch mit der Software von Specim vornehmen und werden deshalb nicht weiter beschrieben. Für die Manipulationen an den Ausgangssignalen ist nur die Registerkarte *Video Amp* interessant, unter dem Offset- und Gainwerte verändert werden können.

Das Offset wird zu dem Ausgangssignal addiert, wodurch eine Aufhellung des gesamten Bildes entsteht. Gain verstärkt das Ausgangssignal, was eine Erhöhung des Kontrastes bewirkt [3]. Siehe hierzu auch Abschnitt 5.1.2 Dunkel- und Hellbildkalibrierung.

### 4.2 Aufnahme mit „SpectralDAQ“

Für Voreinstellungen und Aufnahmen ist im Lieferumfang des Kameraherstellers das Programm „SpectralDAQ“ enthalten. Nachfolgend werden alle für den aktuellen Entwicklungsstand des Projektes benötigten Funktionen erläutert.

Grundlegend ist dieses Programm in zwei Bereiche unterteilt. Auf der rechten Seite befindet sich die Konfigurationsleiste und auf der linken Seite wird die aktuell aufgenommene Situation mittels verschiedener Ansichten dargestellt.

### 4.2.1 Konfigurationsleiste

Die Konfigurationsleiste kann über *View* → *Properties Panel* ein- und ausgeblendet werden. Die Leiste besteht aus fünf unterschiedlichen Registerkarten:

- *Property page* zeigt die aktuelle Konfiguration der Kamera, das heisst Anzahl der Pixel, Anzahl der Bänder, Bittiefe, Bildrate und Belichtungszeit. Diese Registerkarte dient ausschließlich der Information, es können also keine Werte verändert werden.
- *Sensor/Camera Controls* ermöglicht das Einstellen von Binning (spektral und räumlich) sowie das Verändern von Bildrate und Belichtungszeit. Mit der Schaltfläche *Set* werden die vorgenommenen Veränderungen gesetzt und fortan angewendet. Zeigt der Bereich oberhalb der Schaltfläche grün an, werden die vorgenommenen Einstellungen voraussichtlich gute Ergebnisse liefern. Ist dies nicht der Fall, wird rot angezeigt. Dann empfiehlt es sich die Konfiguration zu überarbeiten. Sollen die zuletzt gesetzten Einstellungen wieder hergestellt werden, kann die Schaltfläche *Read* verwendet werden. Außerdem ermöglicht *Shutter* das Öffnen und Schließen der Blende.
- *Spectral Bands* informiert über die zurzeit verwendeten Bänder des Spektrums.
- *System Information* enthält alle relevanten Eigenschaften des verwendeten Computersystems. Dazu gehören vor allem der verfügbare Festplattenspeicher und Arbeitsspeicher sowie die Anzahl der Prozessorkerne.
- *Scan Mirror Control* wird zur Steuerung des Objektisches beziehungsweise des Stativaufsatzes verwendet. Mit den Pfeilschaltflächen können Bewegungen in die jeweilige Richtung ausgeführt werden. Die Stopptaste unterbricht jegliche Bewegung. Weiterhin können Start- und Endpunkte für die Bewegung definiert werden. Die Schaltfläche *Scan* führt diese Bewegung anschließend aus. Diese kann entweder ein einziges Mal mit *Single* oder in einer Endlosschleife mit *Continuous* durchgeführt werden. Mit *Grab Next Scan* wird die nächste erfolgende Bewegung aufgezeichnet. *Scan Settings* ermöglicht außerdem das Verändern der Fahrgeschwindigkeiten des Objektisches beziehungsweise Stativaufsatzes. Die Werte werden in Grad pro Sekunde angegeben.

### 4.2.2 Ansichtsfenster

- *Color View* zeigt die aktuell abgelichtete Zeile so, wie sie auch auf einer späteren Aufnahme aussehen würde. Die Zeile wird dabei in schneller Abfolge immer wieder

aktualisiert angezeigt, was eine Art Wasserfalleffekt zur Folge hat. *Color Balance* und *Brightness* verändern die Farbdarstellung. Die Veränderungen haben aber keine Auswirkungen auf die Aufnahmen. Weiterhin lassen sich die Farbmischungen anhand von Zahlenwerten verändern. *True Color* setzt die RGB Kanäle auf die standardisierten Werte zurück. Ist *Lock Waterfall* aktiviert, werden die aufgezeichneten Zeilen für eine kurze Zeit gehalten bevor sie überschrieben werden. *Mirror/Reverse* spiegelt die Anzeige und mit den *Rotate* Schaltflächen kann die Richtung des Wasserfalls verändert werden.

- *Full Frame Display* zeigt die aktuelle aufgenommene Zeile sowie die Spektren jedes ihrer Pixel. Die Horizontale beschreibt dabei die räumliche, die Vertikale die spektrale Ausdehnung. Der Koordinatenursprung befindet sich in der oberen linken Ecke des Fensters, das heisst Pixel 1 und Band 1. Für die Darstellung existieren drei unterschiedliche Lookup Tabellen, welche über *LUT* oder den entsprechenden Symbolen in der Werkzeuggestreife ausgewählt werden können. Dies ist notwendig, weil auf dem Bildschirm keine 4096 (12 Bit) unterschiedliche Graustufen angezeigt werden können und daher auf 256 Werte heruntergebrochen werden müssen. Folgende Lookup Tabellen stehen zur Verfügung:

- *Linear LUT* behandelt dabei jeden der 4096 Grauwerte gleichwertig, teilt sie also durch 16.
- *Log LUT* behandelt die Grauwerte logarithmisch, was eine Aufhellung der Darstellung zur Folge hat.
- *Lower 8-Bit LUT* stellt die ersten 256 der 4096 Werte originalgetreu dar und setzt die restlichen Werte auf 255.

Alle Werte die außerhalb des erfassbaren Bereiches liegen, werden entweder durch rote oder blaue Pixel dargestellt. Rote Pixel stehen dabei für Werte oberhalb des Wertebereichs, dies ist ein Indikator für eine Überbelichtung des Bildes. Werte unterhalb des Wertebereichs sind blau, das Bild bedarf dann einer Erhöhung der Belichtungszeit.

Innerhalb der Darstellung lassen sich nach einem Rechtsklick außerdem verschiedene Hilfslinien darstellen und verschieben:

- *Toggle Band Display* stellt RGB Linien oder eine Grauwertlinie dar, welche sich anschließend mit der Maus verschieben lassen. Die vorgenommenen Veränderungen sind in den anderen Fenstern sofort sichtbar.
- *Reference Line* → *Toggle Ref Display* aktiviert eine rote und eine blaue Hilfslinie. Sie definieren welche Bänder der aktuellen Zeile im spektralen Profil

angezeigt werden.

- *Spectral Line* → *Toggle Spec Display* aktiviert ebenfalls eine rote und eine blaue Hilfslinie. Diese definieren welche Spektren eines Pixels im räumlichen Profil (*Spatial Profile*) angezeigt werden.
- *Calibration* → *Spatial Profile* zeigt die im *Full Frame Display* ausgewählten Zeilen zweier Bänder und deren Grauwerte. Wird Auto Update aktiviert, wird die Darstellung mit der Aufnahme jeder neuen Zeile aktualisiert.
- *Spectra* → *Spectral View* stellt die im *Full Frame Display* ausgewählten Spektren zweier Pixel dar.

Für Spectral View und Spatial Profile können nach einem Rechtsklick → *Properties* → *Axes* → *Details* die Achsen skaliert werden. Dies ist insbesondere dann von Vorteil, wenn ein bestimmter Teil detaillierter betrachtet werden soll.

### 4.2.3 Aufnahme von Daten

*Cube* → *Cube Maker* ist das Werkzeug zur Speicherung von Aufnahmen. Hier lassen sich Dateinamen und Pfade vordefinieren und mit *Go* wird anschließend eine Aufnahme gestartet. Soll nicht nur die aktuelle Zeile aufgezeichnet werden, sollte zuvor der Objektisch in Bewegung gesetzt werden. *Rec Disp Off* deaktiviert die Darstellungen im *Full Frame Display*. Dies ist zur Steigerung der Performance oft empfehlenswert.

Der rechte Teil des Fensters informiert über die aktuellen Aufnahmebedingungen. Ampelfarben signalisieren dabei die Qualität der Bedingungen. Kommt es während der Aufnahme zu Datenverlust wird dies ebenfalls angezeigt.

### 4.2.4 Aufbau der Ergebnisdaten

Die mit „SpectralDAQ“ erzeugten Aufnahmen liegen im RAW-Format vor. Die Informationen werden dabei unkomprimiert und vor allem unbearbeitet abgespeichert. RAW-Dateien sind allerdings nicht einheitlich aufgebaut. Die mit diesem System erzeugten RAW Daten sind speziell für die Verwendung mit „ENVI“ zugeschnitten.

Die Daten bestehen immer aus einer Bild- und einer Headerdatei:

Die Headerdatei hat die Dateierdung HDR. Sie enthält alle Metainformationen über die erzeugte Aufnahme. Dazu gehören unter anderem der verwendete Sensor, das Aufnahmedatum, Zeilenbreite, Zeilenanzahl, Bänderanzahl, Bittiefe, Framerate, Binning, AOI (Area of interest), eine eventuelle Fehlerliste sowie eine Liste der aufgezeichneten Wel-



lenlängen und deren Bandbreite. Die Datei kann mit einem einfachen Texteditor geöffnet werden.

Die Bilddatei hat die Dateiendung RAW. Sie enthält die tatsächlichen Bildinformationen und ist, da diese unkomprimiert gespeichert werden, sehr groß. Die entstehende Dateigröße einer Aufnahme lässt sich in etwa im Voraus berechnen:

$$\text{Zeilenbreite}(\text{Pixel}) \cdot \text{Bänderanzahl} \cdot \text{Zeilenanzahl} \cdot \text{Bittiefe}$$

Beispiel für eine Full Frame Zeile:

$$1600 \text{ Pixel} \cdot 848 \text{ Bänder} \cdot 12 \text{ Bit} = 16281600 \text{ Bit} = 2035200 \text{ Byte} = 1.94092 \text{ MByte}$$

Hierbei handelt es sich allerdings nur um eine ungefähre Näherungsformel. Tatsächlich sind die Dateien noch etwas größer. Der genaue Dateiaufbau ist leider nicht bekannt.

### 4.3 Auswertung mit „ENVI“

„ENVI“ (ENvironment for Visualizing Images) ist ein Programm der Firma ITT zur Weiterverarbeitung von Bilddaten. Anwendung findet die Software vor allem bei der Auswertung von Satellitendaten aber auch anderer Fernerkundungsdaten. Das Programm besteht aus festen Modulen zur Verarbeitung der Daten, welche den Anwender Schritt für Schritt zum Ergebnis führen. Zusätzlich kann der Nutzer eigene Module für seine Zwecke hinzu programmieren.

„ENVI“ ist ein äußerst umfangreiches Programm, weshalb an dieser Stelle nur die für den aktuellen Entwicklungsstand des Projektes benötigten Funktionen beschrieben werden. Für eine vollständige Beschreibung sei auf das Benutzerhandbuch verwiesen. Der Laborrechner ist mit einer Lizenz der ENVI Version 4.7 SP 2 ausgestattet.

#### 4.3.1 Darstellung von Bildern und Spektren

Die vom Aufnahmeprogramm „SpectralDAQ“ erzeugten RAW Dateien können von „ENVI“ direkt gelesen und dargestellt werden. Es ist keine Konvertierung in andere Formate notwendig.

Über *File* → *Open Image File* wird zunächst das gewünschte Bild ausgewählt. „ENVI“ weist dem Bild automatisch die standardmäßigen RGB Wellenlängen den entsprechenden Bändern des Bildes zu und stellt es anschließend dar. Die Darstellung besteht immer aus einer Gesamtansicht und zwei unterschiedlich stark vergrößerten Ansichten.

Außerdem öffnet sich ein Fenster mit dem Namen *Available Bands List*. Hier werden

alle geöffneten Dateien und deren Bänder angezeigt und ermöglicht die Veränderung der RGB Zuweisung sowie die Erzeugung von Graubildern aus einzelnen Bändern. Neue Darstellungen lassen sich entweder durch die alte Darstellung ersetzen oder in einem neuen Fenster anzeigen, indem unten rechts *Display#* → *New Display* ausgewählt wird. Werden Darstellungsfenster geschlossen, bleibt die Datei trotzdem im Arbeitsspeicher erhalten, um erneute Zugriffe zu beschleunigen. Das endgültige Schließen von Dateien kann nach einem Rechtsklick auf den Dateinamen und *Close Selected File* durchgeführt werden.

Für jedes Pixel kann das zugehörige Spektrum angezeigt werden, indem nach einem Rechtsklick auf eines der Darstellungsfenster *Z Profile (Spectrum)* gewählt wird. Wird ein anderes Pixel angewählt, wird sofort auch das Z-Profil entsprechend aktualisiert.

### 4.3.2 Vergleich von Spektren

Um verschiedene Spektren einer Aufnahme miteinander zu vergleichen, wird die Funktion *Options* → *Collect Spectra* verwendet. Ist diese Funktion aktiviert, werden alle Spektren der von nun an angewählten Pixel in einem Diagramm gesammelt und verschiedenfarbig dargestellt.

Sollen Spektren von unterschiedlichen Aufnahmen miteinander verglichen werden, so können diese in einem neuen Profilfenster vereint werden. Dazu müssen zwei oder mehr Profile unterschiedlicher Bilder geöffnet sein. Über *Options* → *New Window: Blank* wird ein neues, leeres Profilfenster geöffnet. Mit *Options* → *Plot Key* wird die Legende angezeigt, welche standardmäßig mit der Koordinate des angezeigten Pixels betitelt ist. Nun können per „drag and drop“ die gewünschten Legendenelemente in das neue Profilfenster kopiert werden.

Zur Veränderung der Darstellung wird *Edit* → *Data Parameters* geöffnet. Hier können Legendentitel, Punktsymbole, Linienart, -farbe und -breite sowie Generalisierungsstufe (*Nsum*) eingestellt werden.

Sollten die Spektren sich so sehr ähneln, dass eine Unterscheidung nur schwer möglich ist, ermöglicht *Options* → *Stack Plots* eine Stapelung der einzelnen Kurvenverläufe.

### 4.3.3 Rechnungen mit Spektren

Zur Weiterverarbeitung von hyperspektralen Aufnahmen ist es immer wieder erforderlich, Berechnungen an den vorliegenden Spektren vorzunehmen, insbesondere zum Herausrechnen der durch die Beleuchtung verursachten Einflüsse. „ENVI“ bietet dafür das



Modul *Spectral* → *Spectral Math* an. Damit können mathematische Ausdrücke selbst definiert und ausgeführt werden. Sie werden im Feld *Enter an expression* eingegeben und anschließend mit *Add to list* dem Formelbestand hinzugefügt. Auf Wunsch können die Formeln in einer Datei gespeichert und jederzeit wieder aufgerufen werden.

Die Variablen des Ausdrucks müssen immer mit einem „s“ und einer darauf folgenden Nummer bezeichnet werden. Jede Variable steht für ein Spektrum. Für die Konstruktion der Formel kann auf alle herkömmlichen mathematischen Operatoren zurück gegriffen werden.

Im folgenden Fenster werden den Variablen Spektren zugewiesen. Die zu verwendenden Spektren müssen auf dem Bildschirm angezeigt sein, um sie für die Berechnung verwenden zu können. Soll für eine Variable nacheinander jedes Pixel eines Bildes eingefügt werden, wird die Funktion *Map Variable to Input File* verwendet. Das Programm rechnet dann die Formel für jedes Pixel eines Bildes aus und erzeugt ein entsprechendes Ausgabebild.

#### 4.3.4 Klassifizierung

Das Modul *Spectral* → *Spectral Analyst* ermöglicht es aufgenommene Spektren mit spektralen Bibliotheken von „ENVI“ zu vergleichen, um so automatisch festzustellen, um welchen Typ von Stoff, Pflanze, Mineral oder ähnlichem es sich bei der vorliegenden Aufnahme handeln könnte. Wichtig hierbei ist, dass die verwendeten Spektren vorher von den Beleuchtungseinflüssen befreit wurden.

Nach Aufruf des Moduls wird zunächst die als Referenz zu verwendende Spektrale Bibliothek definiert. Zu finden sind diese unter *Open* → *Spectral Library*. Insgesamt stellt „ENVI“ 27 Bibliotheken fünf verschiedener Herausgeber zur Verfügung. Je nachdem, welche Objekte klassifiziert werden sollen, wird eine der Bibliotheken ausgewählt:

- *igcp264*: Hierbei handelt es sich um fünf Mineralienbibliotheken in denen jeweils die gleichen Stoffe erfasst sind, jedoch mit verschiedenen Spektrometern aufgezeichnet wurden.
- *jhu\_lib*: Große Anzahl verschiedener Bibliotheken für viele Bereiche (Gesteine, Mineralien, Vegetation, Wasser, von Menschenhand geschaffene Objekte, uvm.).
- *jpl\_lib*: Dies ist eine Bibliothek mit 160 unterschiedlichen Mineralien verschiedener Größe.
- *usgs\_min*: Diese Bibliothek enthält viele verschiedene chemische Elemente.
- *veg\_lib*: Hierbei handelt es sich um Bibliotheken speziell für Vegetation. Enthalten sind Spektren grüner und trockener Pflanzen.

Für die Auswahl der richtigen Bibliothek helfen oftmals auch die beiliegenden Informationsdateien der Urheber weiter.

Anschließend öffnet sich das Fenster *Edit Identify Methods Weighting*. Hier stehen drei verschiedene Identifizierungsmethoden zur Verfügung, welche unterschiedlich stark gewichtet werden können.

- Spectral Angle Mapper (SAM)  
Diese Methode bestimmt den Winkel der zwischen den Vektoren von Aufnahme- und Referenzspektrum besteht. Je kleiner der Winkel ausfällt, desto größer die Übereinstimmung. Die Länge der Vektoren spielt dabei keine Rolle. [13]
- Spectral Feature Fitting (SFF)  
Hierbei wird die Methode der kleinsten Quadrate angewendet um Aufnahme- und Referenzspektrum gegenüber zu stellen. Es kann definiert werden in welchem Wellenlängenbereich sich signifikante Eigenschaften befinden. [13]
- Binary Encoding (BE)  
Diese Methode wandelt jeden spektralen Wert des Aufnahme- und Referenzspektrums entweder in eine 0 oder eine 1 um, je nachdem ob dieser oberhalb oder unterhalb des mittleren Spektrums liegt. [13]

Sollen alle Methoden gleichwertig in das Ergebnis mit einfließen, wird für jede ein Gewicht von 0.33 angegeben. Soll nur eine Methode verwendet werden, bekommt diese den Wert 1.0 und die anderen den Wert 0. Die Minimum- und Maximumwerte geben an, in welchem Bereich das Ergebnis liegen muss, damit dieses als Treffer erkannt wird. Die ideale Konfiguration konnte bisher noch nicht erarbeitet werden. Allein durch das Ausprobieren verschiedener Kombinationen konnte festgestellt werden, welche Algorithmuskonstellation bei der vorliegenden Aufnahme am Besten geeignet ist.

Durch einen Klick auf *Apply* wird die Klassifizierung gestartet. Das zu klassifizierende Spektrum muss dazu geöffnet sein. Der Wert *Score* gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit der es sich um eins der Spektren aus der Bibliothek handeln könnte. Werden mehrere Methoden verwendet, werden zum einen alle Einzelergebnisse sowie deren Mittelwert angegeben.

Sollten die Achsen der beiden Spektren unterschiedlich skaliert sein, kann das zu klassifizierende Spektrum mit *Options* → *Edit (x, y) Scale Factors* umskaliert werden.

#### 4.3.5 Erzeugung von Datenwürfeln

Um spektrale und räumliche Informationen in einer Darstellung zu vereinen, steht das Modul *Spectral* → *Build 3D Cube* bereit. Hierbei wird ein Würfel erzeugt, welcher an

der Vorderseite die räumlichen und dahinter die einzelnen Scheiben der spektralen Daten enthält. Die rechte Seite des Würfels zeigt die Spektren aller räumlichen Pixel am rechten Bildrand. Alle anderen Informationen sind verdeckt.

Zur Erzeugung wird zunächst die gewünschte Quelldatei ausgewählt. Sollen auf dem Würfel nur bestimmte Bänder des Spektrums angezeigt werden, wird dies unter *Spectral Subset* entsprechend eingestellt. Im nächsten Dialogfenster werden die RGB Kanäle den gewünschten Bändern zugeordnet und gegebenenfalls der räumliche Bereich (*Spatial Subset*) begrenzt. Dies ist in der Regel erforderlich, wenn sich die interessanten Spektren in der Mitte des Bildes befinden. Diese wären nicht sichtbar, wenn der gesamte Aufnahmebereich ausgewählt wird, weil nur die Spektren des rechten Bildrandes angezeigt werden können. Abschließend stehen verschiedene Farbtabelle für die Visualisierung der Spektren zur Verfügung. Die Abbildung 7 wurde beispielsweise mit der *Rainbow* Farbtabelle erzeugt, bei der dunklere Farben für geringe Intensität und hellere Farben für stärkere Intensität stehen.

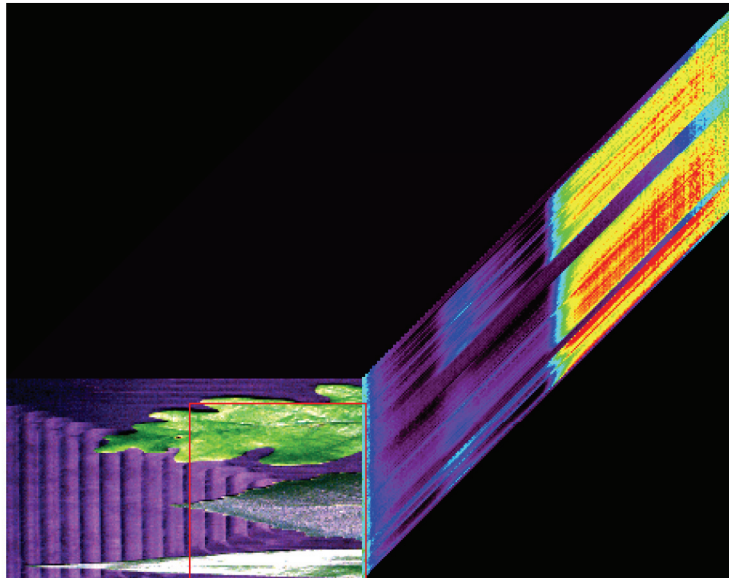


Abbildung 7: Würfeldarstellung

## 5 Messungen

Nachfolgend werden alle vorgenommenen Messungen zur Einrichtung der Hyperspektralkamera beschrieben. Es werden außerdem Aufnahmen bei unterschiedlichen Beleuchtungen aufgezeigt und deren Qualität anschließend bewertet. Außerdem werden die ersten Versuche zur Befreiung von Beleuchtungseinflüssen und Klassifizierung beschrieben.

### 5.1 Vorbereitungen

#### 5.1.1 Fokussierung

Zur Fokussierung der Optik wird zunächst das Objektiv fest an die Kamera angeschraubt. Anschließend wird die 2mm Inbusschraube an dem silbernen Ring des Objektivs leicht gelöst. Daraufhin lässt sich der untere Teil des Objektivs hinein- und heraus-schrauben, während der obere Teil fest mit der Kamera verbunden bleibt. Hierbei gilt: Je geringer der Abstand zum Objekt, desto weiter muss das Objektiv von der Kamera entfernt sein, also herausgeschraubt werden.

Die Fokussierung wurde mit Hilfe eines Siemenssterns (Abbildung 8) durchgeführt. Hierbei handelt es sich um ein kreisförmiges Objekt, welches in abwechselnd schwarze und weiße tortenförmige Stücke aufgeteilt ist. Zur Mitte des Kreises werden damit die Abstände zwischen den Teilen immer kleiner. Zur Fokussierung wurde in etwa das Zentrum des Siemenssterns mit der Kamera angezielt und anschließend fokussiert (Abbildung 9).

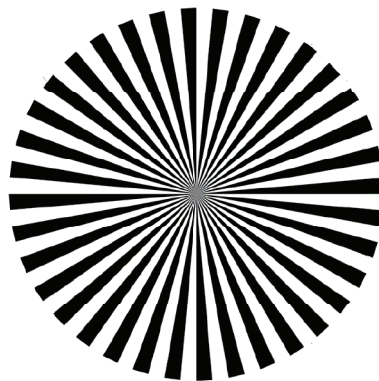


Abbildung 8: Siemensstern

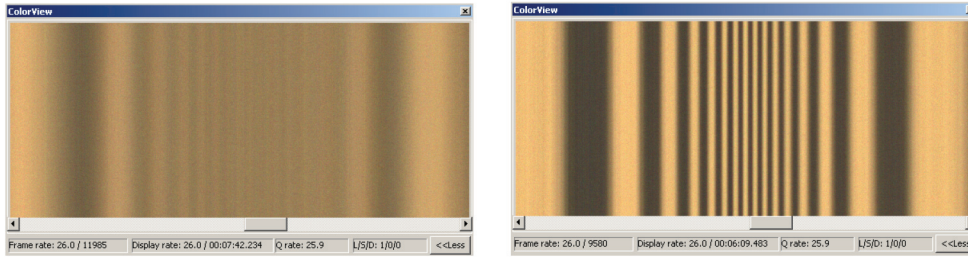


Abbildung 9: Unterschied vor und nach der Fokussierung

### 5.1.2 Dunkel- und Hellbildkalibrierung

Der Sensor gibt die Bildinformationen über zwei separate Kanäle an jeweils einen A/D-Wandler aus. Dies führt dazu, dass sich die Darstellung der linken Bildhälfte meistens von der rechten Bildhälfte unterscheidet (Abbildung 10). Ursache für dieses Phänomen ist die unterschiedliche Helligkeit (Offset) der beiden Signale.

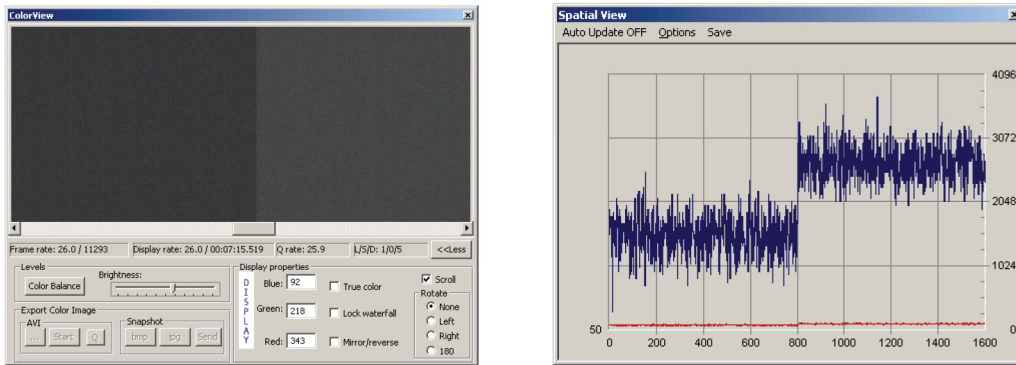


Abbildung 10: Ausgangssituation

Die Abbildung wurde mit aufgeschraubtem Objektivdeckel erzeugt, um maximale Dunkelheit zu erhalten. Wäre die Kamera korrekt eingestellt, müsste das Bild nun schwarz sein. Die Abbildung zeigt aber ein eher graues, mit vertikalen Streifen verrauschtes Bild. Außerdem ist der Unterschied der beiden Kanäle deutlich erkennbar. Mit Hilfe der Offseinstellungen in „Lynx Configurator“ ließen sich die beiden Ausgabesignale angleichen. Um die Veränderungen deutlich sichtbar zu machen, wurden in „SpectralDAQ“ das räumliche Profil (*Calibration* → *Spatial profile*), *Video View* und das *Full Frame Display* mit der *Lower 8-bit LUT* aufgerufen. Das räumliche Profil wurde auf den Bereich 0 bis 100 skaliert (Rechtsklick → *Properties* → *Axes* → *Details*). Die Offsetwerte wurden nun so angepasst, dass sie in etwa der Mitte des Diagramms einen horizontalen Verlauf aufwie-



sen. Auf den Ansichtsfenstern sind nun keine Helligkeitsunterschiede mehr festzustellen (Abbildung 11).

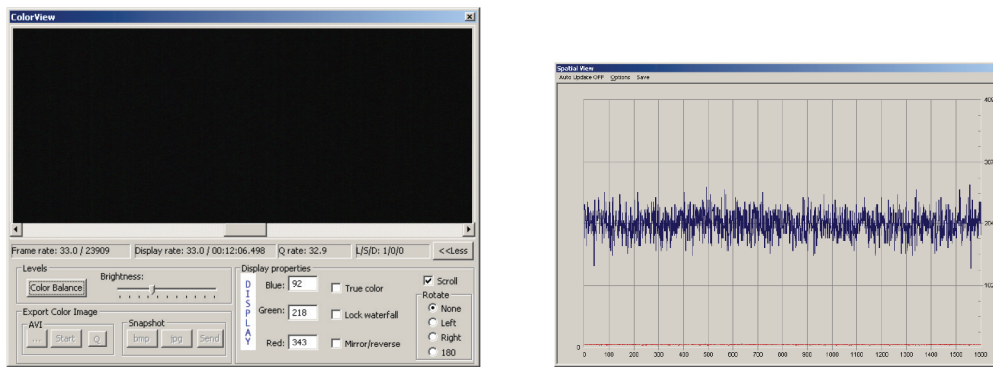


Abbildung 11: Zielsituation Dunkelbildkalibrierung

Anschließend wurde der Objektivdeckel entfernt und eine weiße, glatte Oberfläche angezielt. Durch Erhöhung der Belichtungszeit wurde die Intensität nun seinem Maximum angenähert und der entsprechende Bereich im räumlichen Profil vergrößert. Mit Hilfe der Gaineinstellungen in „Lynx Configurator“ wurde nun der Sprung im Verlauf der Kurve ausgeglichen (Abbildung 12). Die vorgenommene Konfiguration wurde abgespeichert und wird von nun an standardmäßig verwendet.

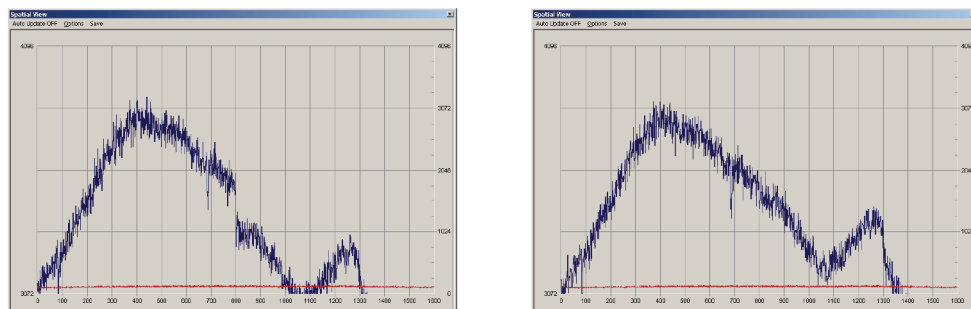


Abbildung 12: Ausgangs- und Zielsituation Hellbildkalibrierung

### 5.1.3 Bestimmung des optimalen Beleuchtungsabstands

Für die Bestimmung des optimalen vertikalen Abstands der Halogenleuchten zum Objektisch wurden drei Messungen in unterschiedlichen Abständen vorgenommen. Beobachtet wurde dabei die Intensitätskurve eines Bandes bei jeder Beleuchtungssituation. Bei idealen Lichtverhältnissen sollte diese Kurve einer Geraden ähneln. Als Beobachtungsobjekt wurde ein weißes, glattes Stück Plastik verwendet. Die Abstände beziehen

sich von Oberkante des Bodenrahmens auf die Unterkante des Winkels zur Befestigung des Lampengehäuses.

1. Abstand von 23 cm

Hierbei handelt es sich um die geringst mögliche Höhe, bei der keine mit bloßem Auge erkennbare Spotbildung mehr erfolgt. Alle Abstände unterhalb von 23 cm sind damit definitiv nicht brauchbar. Der wellenförmige Verlauf in Abbildung 13 lässt auf eine Spotbildung links und rechts schließen. Interessant ist hierbei, dass die mittig strahlende Halogenleuchte keinen Spot verursacht. Die Intensität nimmt zu den Seiten hin sehr stark ab.

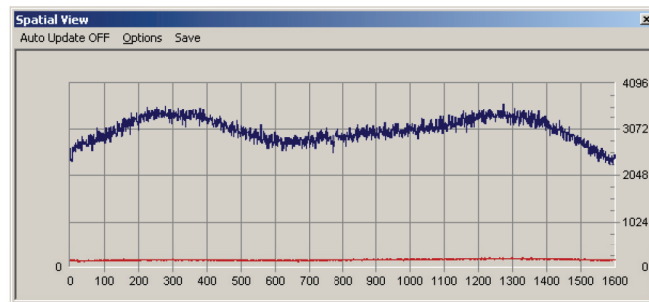


Abbildung 13: Intensitätskurve bei 23 cm Abstand

2. Abstand von 27 cm

Bei der Vergrößerung des Abstands ist eine leichte Verbesserung der Situation erkennbar (Abbildung 14). Die Spotbildung fällt etwas geringer aus, ist aber noch deutlich erkennbar. Auch hier ist ein starker Intensitätsabfall an den Seiten festzustellen.

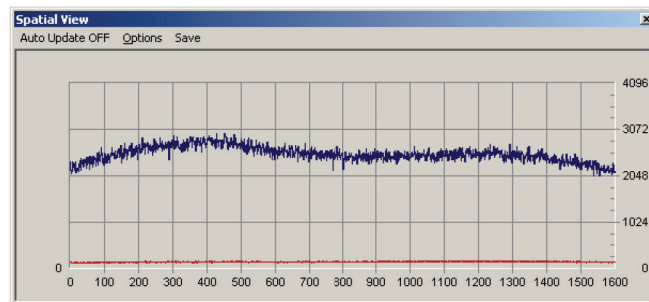


Abbildung 14: Intensitätskurve bei 27 cm Abstand

3. Abstand von 30,8 cm

Hierbei handelt es sich um den größt möglichen Abstand, den der Rahmen erlaubt.

Aus Abbildung 15 ist ersichtlich, dass der Verlauf der Kurve hier wesentlich homogener aber auch weniger intensiv als bei obigem Abstand ausfällt. Es ist keine Spotbildung mehr erkennbar. Jedoch ist ein leichter Abfall der Intensität in der rechten Bildhälfte festzustellen.

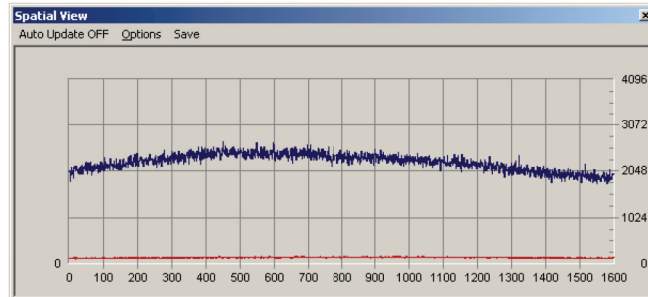


Abbildung 15: Intensitätskurve bei 30,8 cm Abstand

Für eine optimale Ausleuchtung ist der größtmögliche Abstand am Besten geeignet, da er den geradesten Intensitätsverlauf ermöglicht. Nicht zu vermeiden ist die leichte Verdunkelung an den Seiten des Bildes.

Während der Projektzeit kam es zu einem Defekt bei einem der beiden Lüfter. Vermutlich führte die dadurch vermehrt abstrahlende Wärme der Lampen auf dieser Seite zur Erhöhung der Intensität.

#### 5.1.4 Betriebstemperaturen

Die Betriebstemperatur des Gerätes steigt mit seiner Laufzeit. Um feststellen zu können, nach welcher Zeit die Temperatur ein einigermaßen konstantes Niveau beibehält, wurde nach einem Kaltstart des Gerätes immer wieder die Temperatur gemessen. Dies erfolgte mit Hilfe der Temperaturanzeige in „Lynx Configurator“. Hierbei wurde deutlich, dass sich das Gerät erst nach etwa 70 Minuten Laufzeit nicht mehr weiter erwärmt und sich bei circa 50 Grad Celsius einpendelt (Abbildung 16).



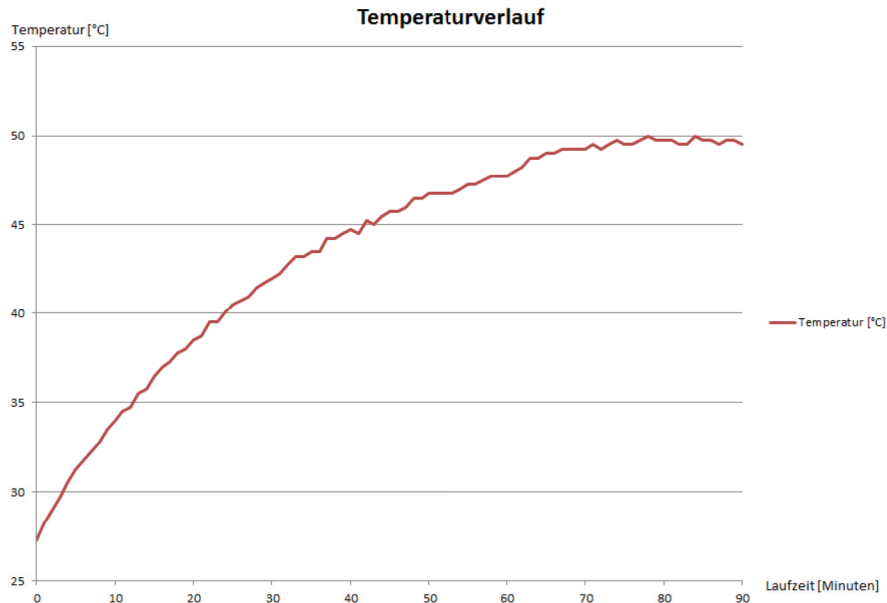


Abbildung 16: Temperaturverlauf

Die Steigerung der Temperatur wirkt sich direkt auf die Empfindlichkeit des Sensors aus. Daher wurde die Kalibrierung von Dunkel- und Hellbild erst nach einer Aufwärmzeit von etwa 70 Minuten durchgeführt. Das bedeutet allerdings auch, dass die Kamera mit dieser Kalibrierung nach jedem kalten Start erst nach Ablauf dieser Zeit einsetzbar ist. Diese langen Wartezeiten können überbrückt werden, indem die Dunkelbildkalibrierung in regelmäßigen Abständen bis zum Erreichen der Maximaltemperatur wiederholt wird.

### 5.1.5 Bildrate, Belichtungszeit und Fahrgeschwindigkeit

Die Bildrate gibt an, wie viele Aufnahmen in jeder Sekunde durchgeführt werden. Die Belichtungszeit gibt an, wie lange für jede dieser Aufnahmen Licht am Sensor gesammelt wird. Daraus folgt: Je höher die Bildrate, desto niedriger muss die Belichtungszeit sein, damit es nicht zu Datenverlust kommt. Und je niedriger die Bildrate, desto höhere Belichtungszeiten sind möglich. Soll außerdem die Geometrie des Objektes korrekt wiedergegeben werden, müssen Bildrate und Fahrgeschwindigkeit des Objektisches so angepasst werden, dass keine Verzerrungen oder Stauchungen entstehen.

Um die idealen Einstellungen für die jeweiligen Aufnahmeverhältnisse zu ermitteln kann folgendermaßen vorgegangen werden:

Zunächst wird bestimmt, wie groß der abgelichtete Bereich des Objektes pro Pixel ist. Bei

einer Full Frame Aufnahme werden 1600 Pixel pro Zeile aufgezeichnet. Der Aufnahmebereich beschränkt sich bei dem aktuellen Kameraabstand von 280 mm zum Objekt auf 128 mm. Daraus ergibt sich, dass pro Pixel 0,08 mm in X-Richtung aufgezeichnet werden.

$$dx = \frac{\text{Aufnahmebereich}}{\text{Zeilenpixel}} = \frac{128\text{mm}}{1600\text{px}} = 0,08\text{mm/px}$$

Um die Geometrie des Objektes aufrecht zu erhalten gilt  $dx = dy$  [13].

Die optimale Fahrgeschwindigkeit ergibt sich anschließend aus dem Produkt von Zeilenfrequenz und Objektgröße pro Pixel in Y-Richtung. Laut Hersteller ist bei einer Full Frame Aufnahme eine Zeilenfrequenz von 33 Hz realisierbar.

$$\text{Fahrgeschwindigkeit} = \text{Zeilenfrequenz} \cdot dy = 33\text{Hz} \cdot 0,08\text{mm} = 2,64\frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

Im Aufnahmeprogramm „SpectralDAQ“ wird die Fahrgeschwindigkeit in Grad pro Sekunde angegeben. Leider ist nicht klar, wie groß der Radius des dabei verwendeten Kreises tatsächlich ist, da der Mittelpunkt nicht bekannt ist. Es gilt daher festzustellen, welche Strecke der Objektstisch pro Sekunde mit der jeweiligen Einstellung zurücklegt. Dazu wurde eine Teststrecke von 100 mm definiert und dieser Bereich mit einer Geschwindigkeit von 10 °/s abgefahren. Dafür benötigt der Objektstisch 9 Sekunden. Daraus ergibt sich wiederum, dass pro Sekunden 11,11 mm zurückgelegt werden.

Mit Hilfe einfacher Verhältnisrechnung ergibt sich für die zuvor errechnete optimale Geschwindigkeit von 2,64 mm/s ein Wert von 2,22 °/s, welcher in „SpectralDAQ“ eingestellt werden kann.

## 5.2 Aufnahmen bei unterschiedlichen Beleuchtungen

Ziel der folgenden Analysen ist es, herauszufinden wie sich unterschiedliche Beleuchtungen auf die Aufnahmebedingungen und die letztendliche Qualität der Aufnahmeergebnisse auswirken. Dazu wurde zunächst versucht das markante Spektrum der jeweiligen Beleuchtung zu erfassen. Neben den standardmäßig verwendeten Halogenlampen wurden auch Aufnahmen mit Neonlicht, Infrarotlicht sowie bei Tageslicht durchgeführt. Als Weißreferenz wurde ein weißes Stück Plastik verwendet, da es durch seine glatte, helle Oberfläche das Licht gut reflektiert.

Anschließend wurde unter jedem der Lichtquellen ein schwarzer Zeichenkarton, verschieden farbige Plastikstücke, Salzkristalle und der Objektstisch aufgenommen und verglichen. Dabei wurde nicht auf die Erhaltung der Objektgeometrie geachtet.

### 5.2.1 Halogenlampen

Die Halogenlampe ist die standardmäßig in der Labormessvorrichtung verbaute Lichtquelle. Sie wurde bereits in Abschnitt 3.2.2 näher beschrieben.

Die Abbildung 17 stellt das in etwa erwartete Spektrum von Halogenlampen dem selbst erzeugten Spektrum gegenüber. Bei dem Referenzspektrum handelt es sich allerdings nur um eine ungefähre Darstellung, sie soll nur grob die Charakteristika von Halogenlampen beschreiben. Jeder Halogenlampentyp hat seine eigenen besonderen Merkmale.

Beide Spektren weisen einen sehr starken Rotanteil und einen geringen Blauanteil auf. Dazwischen steigt der Verlauf bei beiden Spektren kontinuierlich an und fällt nach Erreichen des Maximums wieder ab. Jedoch geschieht dies bei dem selbst erzeugten Spektrum wesentlich steiler als bei dem Referenzspektrum. Das Maximum ist schon bei etwa 675 nm erreicht; beim Referenzspektrum liegt dies erst bei etwa 900 nm. Dennoch bleibt festzuhalten, dass das erzeugte Spektrum in etwa den Erwartungen entsprechen kann.

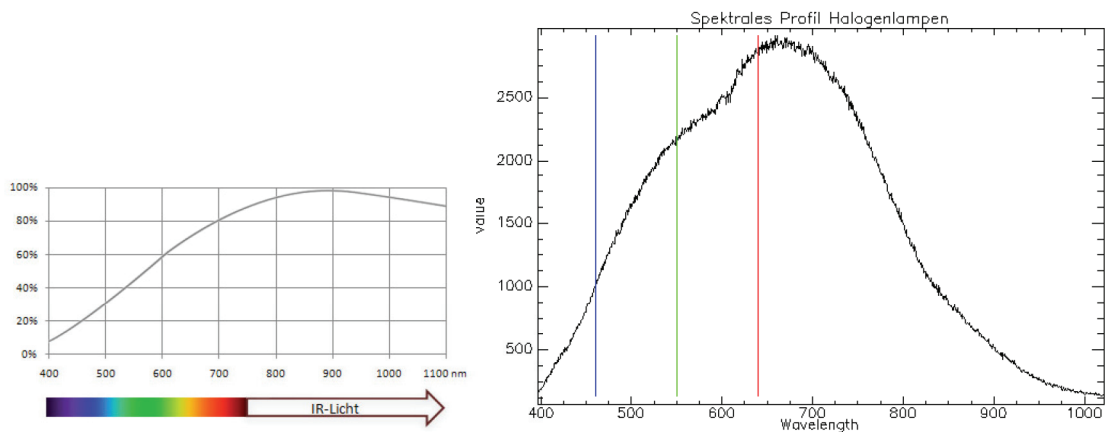


Abbildung 17: In etwa erwartetes [10] (links) und erzeugtes (rechts) Spektrum von Halogenlampen

Durch die intensive Beleuchtung werden nur kurze Belichtungszeiten benötigt, daher sind Aufnahmen mit hoher Bildrate leichter realisierbar. Die vorliegenden Aufnahmen wurden mit einer Bildrate von 26 Hz und einer Belichtungszeit von 13 ms aufgenommen.

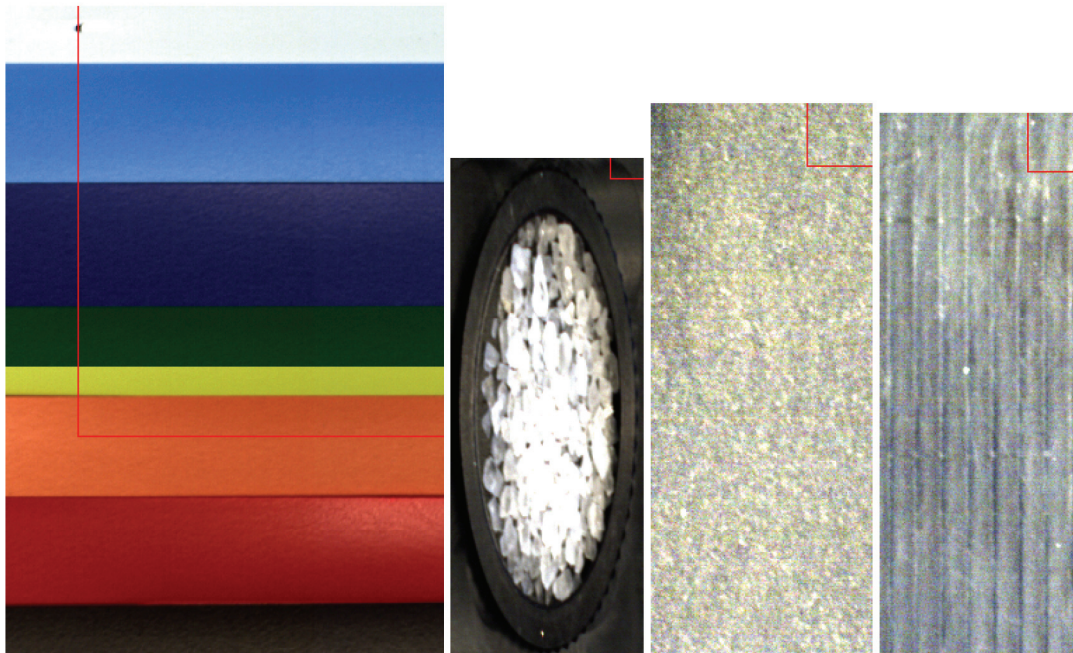


Abbildung 18: Aufnahmen mit Halogenbeleuchtung

Die Farbwiedergabe der bunten Plastikstücke im linken Bild wirkt sehr natürlich und homogen. Die Farbübergänge sind scharf voneinander getrennt. Auch die Oberflächenstruktur und leicht spiegelnde Eigenschaft des Plastiks sind sehr gut erkennbar (Abbildung 18).

Die Aufnahme der Salzkristalle (zweites B. v. li.) ist zwar in der Mitte leicht überbelichtet aber dennoch sehr kontrastreich. Der schwarze Objektisch und der schwarze Objektträger im Hintergrund sind gut voneinander zu unterscheiden. Weiterhin ist die Kristallstruktur des Salzes - besonders in den Randbereichen wo diese nicht übereinander liegen - erkennbar.

Der schwarze Zeichenkarton (drittes B. v. li.) ist unter diesen Bedingungen nicht korrekt erfassbar. Die Struktur des Kartons ist offenbar zu rau, sodass das Licht nur stark diffus reflektiert wird, was ein eher helles und verrauschtes Bild zur Folge hat.

Wird der Objektisch allein aufgenommen (viertes B. v. li.), wirkt das Ergebnis sehr blass und überbelichtet. Ursache dafür ist höchstwahrscheinlich, die stark glänzende Oberflächenstruktur.

Generell fällt auf, dass für qualitativ hochwertige Aufnahmen ein möglichst starker Farbkontrast zwischen den abgeleuchteten Objekten bestehen muss. Gute Aufnahmen einfarbiger Objekte wie die beiden schwarzen Objekte in den rechten Abbildungen sind nicht

möglich.

## 5.2.2 Tageslicht

Als Referenz dient hier das von der Internationalen Beleuchtungskommission (CIE) erfasste europäische Tageslichtspektrum „D65“, welches auf deren Webseite als Exceltabelle frei zur Verfügung steht [12]. Das im Labor aufgezeichnete Spektrum wurde durch Aufnahme des weißen Plastikstücks erzeugt. Der Vergleich der beiden Spektren in Abbildung 19 lässt deutlich darauf schließen, dass das Gerät zuverlässig arbeitet. Insbesondere im Wellenlängenbereich zwischen 600 und 800 nm sind deutliche Übereinstimmungen zu erkennen.

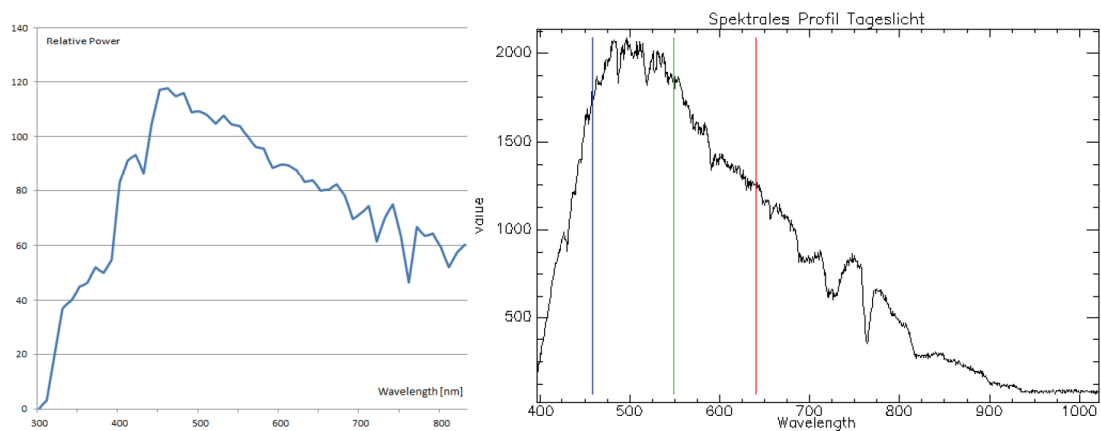


Abbildung 19: In etwa erwartetes [12] (links) und erzeugtes (rechts) Spektrum des Tageslichts

Um nur mit Hilfe von Tageslicht überhaupt ausreichend Energie am Kamerasensor zu sammeln, sind sehr hohe Belichtungszeiten erforderlich. Die Bildrate muss also ebenfalls dementsprechend verringert werden. Die vorliegenden Aufnahmen wurden mit einer Bildrate von 7 Hz und einer Belichtungszeit von 141,8 ms erzeugt.



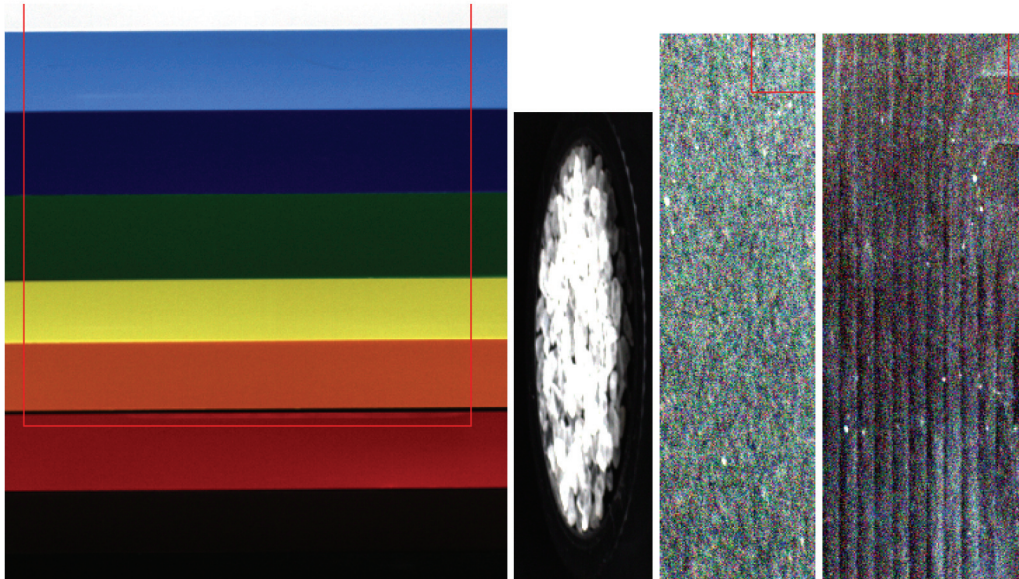


Abbildung 20: Aufnahmen bei Tageslicht

Diese hohe Belichtungszeit bewirkt, dass die Farbdarstellung einen äußerst matten und kontrastarmen Eindruck erweckt. Letzteres wird insbesondere bei der Aufnahme der Salzkristalle (zweites B. v. li.) deutlich. Während hier bei der Aufnahme mit Halogenleuchten der Objektisch noch klar vom Objektträger zu unterscheiden war, ist dies bei Tageslicht nicht mehr möglich. Die beiden einfarbigen Objekte rechts sind sehr stark verrauscht (Abbildung 20). Auch hier gilt, je kontrastreicher die abzulichtenden Objekte, desto hochwertiger die Aufnahme.

### 5.2.3 Neonlicht

Die besondere Eigenschaft von Neonlampen sind drei Peaks im blauen, gelben und roten Bereich des Spektrums. Beim Referenzspektrum handelt es sich um ein beliebiges Neonlichtspektrum, welches aber die charakteristischen Eigenschaften gut widerspiegelt. In dem im Labor aufgezeichneten Spektrum wurden die Deckenleuchten des Raumes verwendet. Die charakteristischen Eigenschaften sind hier ebenfalls deutlich wiederzufinden (Abbildung 21).

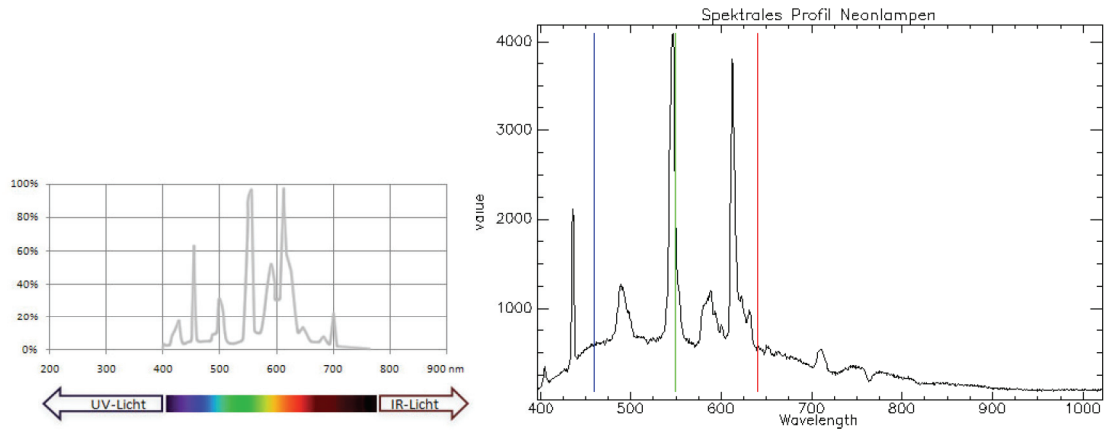


Abbildung 21: In etwa erwartetes [10] (links) und erzeugtes (rechts) Spektrum von Neonlicht

Um mit den Neonlampen an der Decke des Labors halbwegs unverrauschte und farbgetreue Aufnahmen erzeugen zu können, muss eine sehr hohe Belichtungszeit verwendet werden. Die vorliegenden Aufnahmen wurden mit einer Bildrate von 7 Hz und einer Belichtungszeit von 141,8 ms aufgenommen. Wie auch schon bei der Beleuchtung durch Tageslicht ist die Farbdarstellung durch die hohe Belichtungszeit sehr matt und kontrastarm. Weiterhin fällt insbesondere in den beiden rechten Aufnahmen auf, dass diese mit einem leichten Gelbstich versehen sind (Abbildung 22).

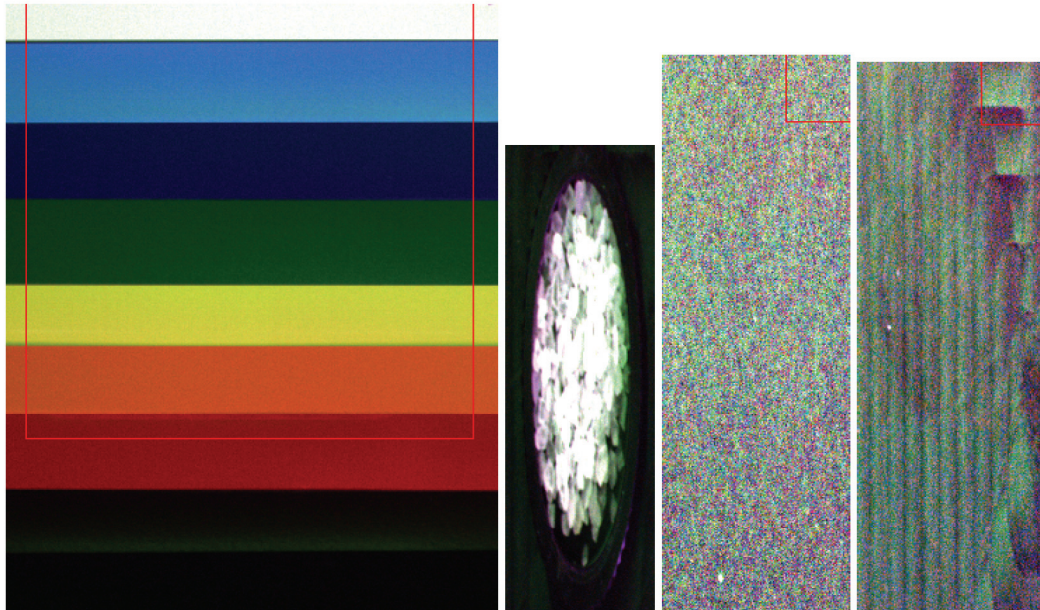


Abbildung 22: Aufnahmen mit Neonbeleuchtung

#### 5.2.4 Infrarotlampe

Charakteristisch für Infrarotlampen ist, dass diese nur einen sehr kleinen Wellenlängenbereich abdecken, welcher je nach Gerät variabel ist. Das Referenzspektrum zeigt zwei mögliche Spektren, dient aber nur als Beispiel zur Veranschaulichung des Sachverhalts. Zu erwarten ist also ein Spektrum welches bis auf einen Anstieg im Spektralbereich der Lampe keine Werte aufweist.

Die im Labor vorhandene LED Infrarotlampe deckt einen Bereich zwischen 800 und 1000 nm ab, wobei dessen Maximum bei circa 900 nm liegt. Die vorliegende Aufnahme wurde zwar bei Nacht durchgeführt, dass Restlicht ist allerdings trotzdem noch so stark, dass auch vor und hinter dem Spektralbereich der Lampe Werte aufgezeichnet wurden. Dennoch ist der zu erwartende Anstieg im Infrarotbereich des Spektrums deutlich erkennbar (Abbildung 23).



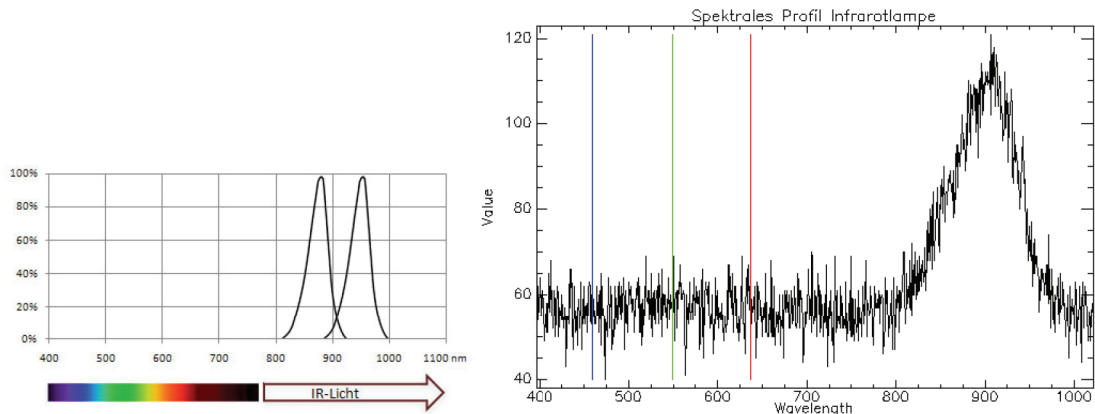


Abbildung 23: In etwa erwartetes [10] (links) und erzeugtes (rechts) Spektrum von Infrarotlicht

### 5.2.5 Fazit

Der rein optische Vergleich von Spektren der verschiedenen Beleuchtungsarten zeigt, dass das Gerät korrekt arbeitet. Die zu erwartenden Spektren der Beleuchtungen konnten in jedem Fall erzeugt werden. Es bleibt allerdings festzuhalten, dass der Sensor der Kamera offensichtlich sehr helle Lichtquellen benötigt um zuverlässig arbeiten zu können. Abgesehen von den Halogenlampen sind die Lichtquellen für den optimalen Betrieb unbrauchbar, denn sie benötigen viel zu hohe Belichtungszeiten um einigermaßen unverrauschte und kontrastreiche Aufnahmen erzielen zu können. Hohe Belichtungszeiten bedürfen wiederum einer Reduzierung der Bildrate und - zum Erhalt der Geometrie - damit auch einer Verringerung der Fahrgeschwindigkeit des Objektstisches. Weiterhin konnte festgestellt werden, dass einfarbig schwarze Objekte für die Ablichtung meist ungeeignet sind. Es werden immer möglichst hohe Farbabstufungen benötigt, damit das Ergebnis unverrauscht, oberflächenstrukturetreu und natürlich wirkt. Weiterhin sind Objekte mit sehr feiner rauher Oberfläche nicht korrekt erfassbar, da diese das Licht stark diffus reflektieren.

## 5.3 Befreiung von Beleuchtungseinflüssen und Klassifizierung

Die Spektren der erzeugten Aufnahmen spiegeln hauptsächlich die Einflüsse der Beleuchtung wider. Die Spektren des abgelenkten Objektes werden durch sie verdeckt. Daher müssen in der Nachbereitung die Einflüsse der Beleuchtung aus den Spektren entfernt werden.

Als Testobjekt dient hier ein Eichenblatt. In den Bibliotheken von „ENVI“ sind in der Datei *veg\_2grn.sli* verschiedene Spektren von Eichenblättern hinterlegt. Die Abbildung 24 stellt zunächst das Spektrum des Eichenblattes vor der Nachbearbeitung dem Bibliotheksspektrum gegenüber. Diese sind noch nicht direkt miteinander vergleichbar, da das erzeugte Spektrum auf der Y-Achse die gespeicherten Grauwerte pro Band angibt, während das Referenzspektrum die relative Intensität als Y-Achse verwendet. Außerdem sind die X-Achsen unterschiedlich skaliert.

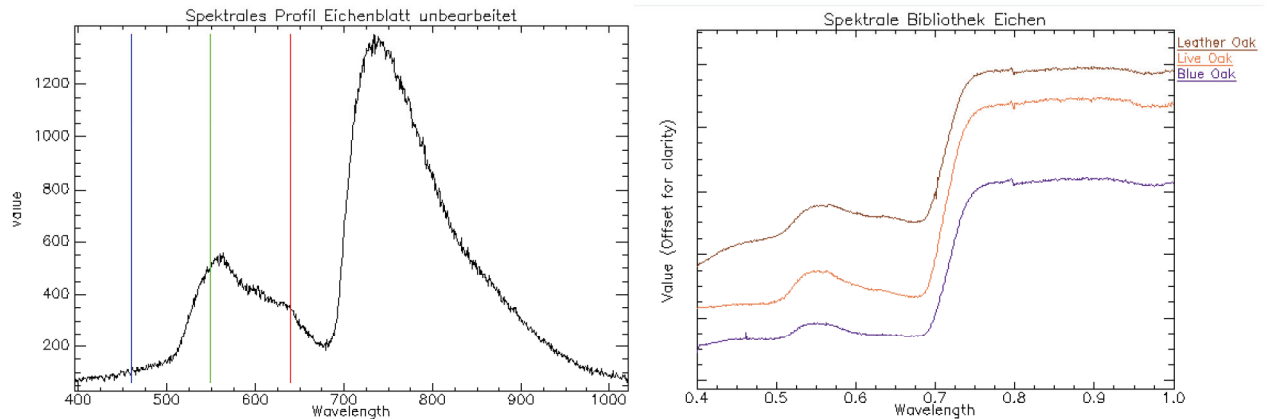


Abbildung 24: Eiche: Spektrum vor Nachbearbeitung (links) und Bibliotheksspektren (rechts)

Um Aufnahmen mit Referenzspektren vergleichbar zu machen, müssen also die Grauwerte in relative Intensität umgerechnet und gleichzeitig von den Beleuchtungseinflüssen befreit werden. Dazu wird ein weißes Referenzspektrum benötigt, welches unter den gleichen Aufnahmebedingungen wie die zu bearbeitende Aufnahme erzeugt worden sein muss. Dieses Spektrum spiegelt die maximalen Reflexionsmöglichkeiten wider, welche mit der Halogenbeleuchtung erzeugt werden können. Hier wurde das bereits im Vorfeld mehrmals verwendete weiße Plastikstück erneut eingesetzt.

Mit Hilfe des *Spectral Math* Moduls in „ENVI“ wurde nun folgende Formel umgesetzt, welche in etwa aus [13] übernommen wurde:

$$s1/s2$$

*s1* steht dabei für jedes einzelne Pixel der zu bearbeitenden Aufnahme und *s2* steht für das Spektrum der weißen Referenz. Die Ausführung dieser Berechnung hat den Effekt, dass keine Werte größer 1 im Ergebnisbild existieren, da alle maximal reflektierenden

Bänder den Wert 1 erhalten und alle weniger stark reflektierenden Bänder bekommen Werte kleiner 1.

Die Abbildung 25 zeigt das Ergebnisspektrum nach der Durchführung der Berechnung. Es sind bereits deutliche Ähnlichkeiten mit den Bibliotheksspektren zu erkennen. Lediglich im Bereich der 400 nm steigt das erzeugte Spektrum stark an. Diese Eigenschaft ist in den Referenzspektren nicht zu finden. Weiterhin fällt auf, dass der Bereich des nahen Infrarot stark verrauscht ist. Dieser Effekt tritt zwar auch in den Referenzspektren auf, ist dort aber weniger stark vertreten. Eine Ursache dafür konnte bisher nicht ausgemacht werden.

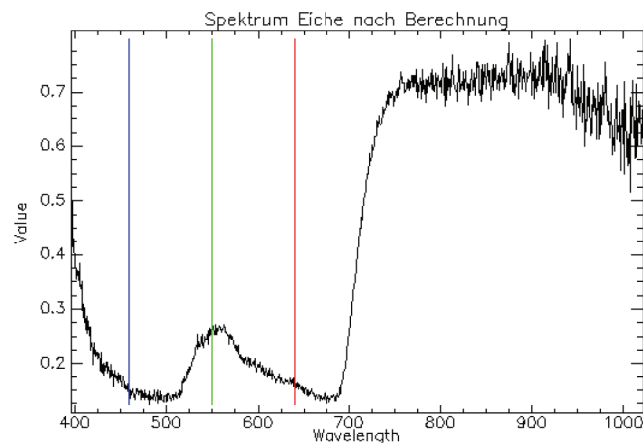


Abbildung 25: Spektrum des Eichenblattes nach der Berechnung

Es wird nun versucht mit Hilfe des *Spectral Analyst* das vorliegende Spektrum als Eiche identifizieren zu lassen. Zunächst wurden die Werte der X-Achsen mit einem Faktor von 0,001 umskaliert, damit diese zu den Werten der erzeugten Spektren passt. Für die Klassifizierung wurden nur die Methoden *Spectral Angle Mapper* und *Binary Encoding* mit jeweils einem Gewicht von 0,5 in die Berechnung mit einbezogen. *Spectral Feature Fitting* lieferte unabhängig vom betrachteten Wellenlängenbereich für alle Bibliotheksspektren das gleiche Ergebnis und wurde daher nicht verwendet.

Library Spectrum	Score	SAM	BE
Leather Oak	[0.904]	{0.812}	{0.996}
Coyote Bush 1	[0.893]	{0.790}	{0.995}
Blue Oak	[0.887]	{0.787}	{0.988}
Coyote Bush 2	[0.885]	{0.778}	{0.993}
Live Oak	[0.879]	{0.766}	{0.993}
Madrone	[0.872]	{0.750}	{0.993}
Bay Laurel	[0.871]	{0.752}	{0.989}
Tarweed	[0.870]	{0.749}	{0.992}
Toyon	[0.869]	{0.746}	{0.992}
Coast Sage	[0.859]	{0.722}	{0.995}
Common Buck Bush	[0.858]	{0.734}	{0.981}
Chamise (Green)	[0.856]	{0.720}	{0.993}
Coast Redwood (Green)	[0.856]	{0.729}	{0.982}
Arroyo Willow	[0.855]	{0.725}	{0.985}
California Valley Oa	[0.853]	{0.725}	{0.982}
Red Willow	[0.847]	{0.712}	{0.981}
Dove Weed	[0.832]	{0.669}	{0.994}
Coast Redwood (Dry)	[0.831]	{0.691}	{0.971}
Chamise (Flower)	[0.821]	{0.651}	{0.991}
Dry Grass	[0.781]	{0.618}	{0.943}
Jasper Ridge Butano	[0.770]	{0.597}	{0.942}
Jasper Ridge Serpent	[0.750]	{0.592}	{0.908}
C. Buckeye	[0.741]	{0.596}	{0.886}
Jasper Ridge Grassla	[0.740]	{0.593}	{0.888}
Jasper Ridge Gravel	[0.679]	{0.490}	{0.869}

Abbildung 26: Ergebnis der Klassifizierung

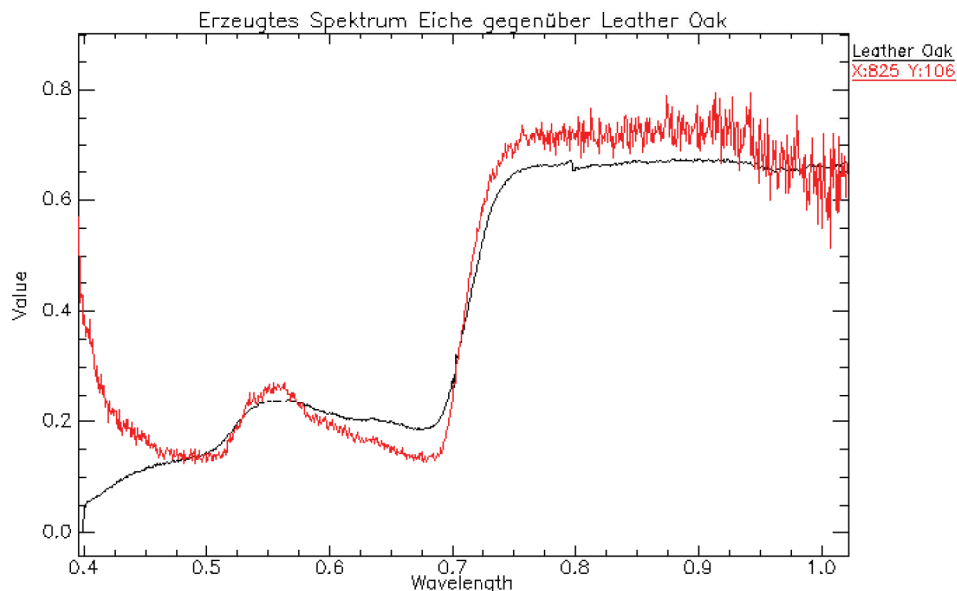


Abbildung 27: Erzeugtes Spektrum Eiche gegenüber Bibliotheksspektrum *Leather Oak*

Das Ergebnis zeigt, dass der Algorithmus das Spektrum mit größter Wahrscheinlichkeit für eine Eiche hält (Abbildung 26 und 27). Lediglich der *Coyote Bush* käme für den Algorithmus ebenfalls in Frage, welcher ähnliche spektrale Eigenschaften vorzuweisen scheint wie das Blatt einer Eiche. Da diese beiden Pflanzen allerdings völlig unterschiedliches Aussehen und unterschiedliche Lebensräume aufweisen, könnte der Bearbeiter im

Praxisfall entscheiden um welche der beiden Arten es sich handelt.

Tendenziell lässt sich also festhalten, dass die durchgeführte Berechnung zur Befreiung von Beleuchtungseinflüssen korrekte Resultate erzeugt, da diese anschließend von *Spectral Analyst* klassifiziert werden können.

## 6 Empfehlungen für die Durchführung von Messungen

Dieses Kapitel soll einige Hilfestellungen und Empfehlungen für die Durchführung von Messungen mit der Hyperspektralkamera geben. Mit Hilfe eines Flussdiagramms werden alle zuvor beschriebenen erforderlichen Arbeitsschritte von den Voreinstellungen über Aufnahme bis hin zur Nachbearbeitung chronologisch aufgeführt und auf die entsprechenden Kapitel in diesem Text verwiesen (Abbildung 28).

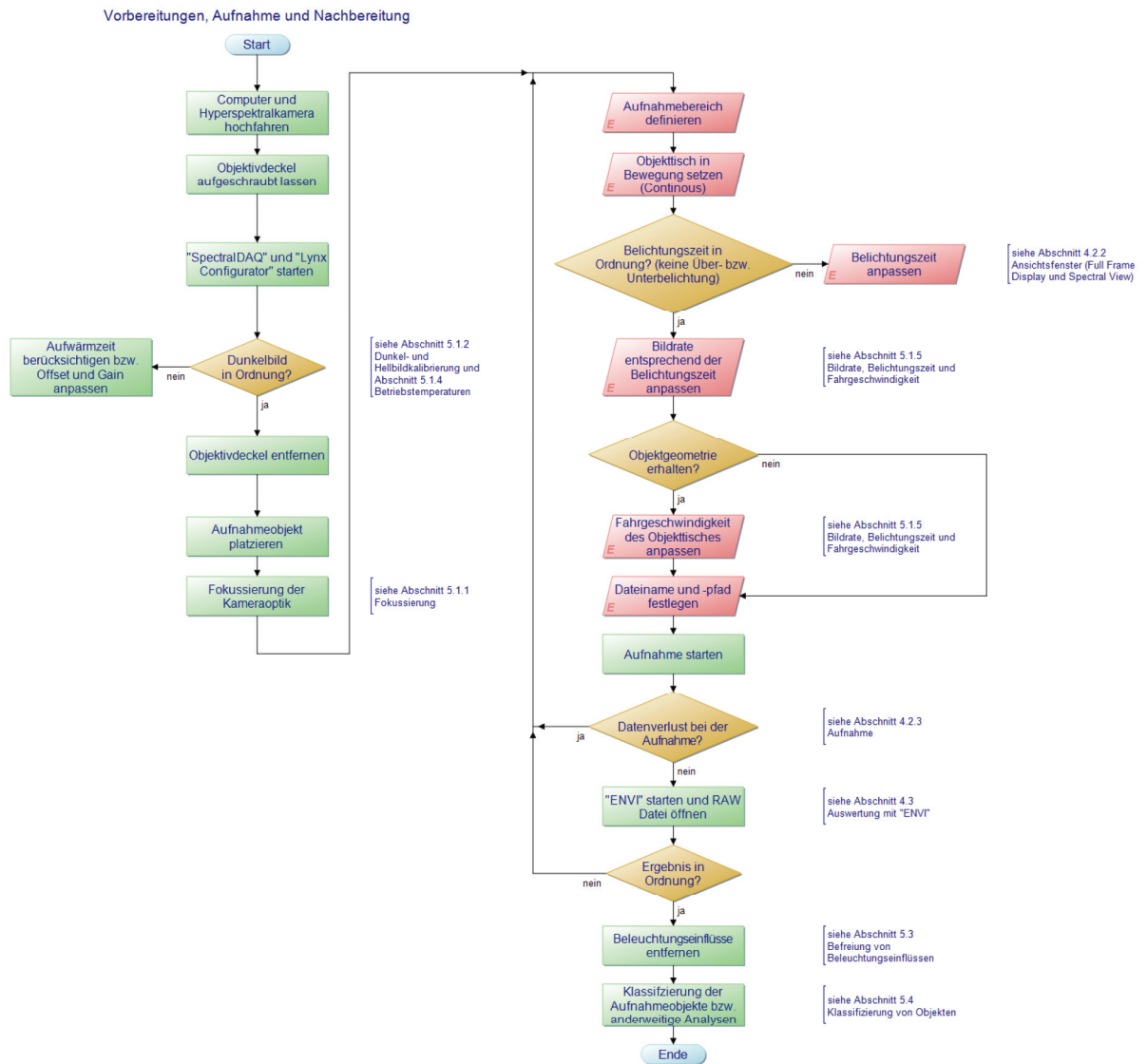


Abbildung 28: Flussdiagramm zu Vorbereitungen, Aufnahme und Nachbereitung



Als Ausgangswerte für die Konfiguration der Aufnahme können eine Bildrate von 33 Hz, eine Belichtungszeit von circa 13 ms und eine Fahrgeschwindigkeit von 2 °/s angenommen werden. Sollte es bei der Aufnahme zu Datenverlust kommen, empfiehlt es sich die Bildrate in kleinen Schritten zu verringern und gegebenenfalls die Fahrgeschwindigkeit des Objektisches zu erhöhen. Dabei muss darauf geachtet werden, dass Bildrate und Belichtungszeit sich nicht zu sehr annähern. Bei der Platzierung von Aufnahmeobjekten sollte stets eine möglichst kontrastreiche Situation erzeugt werden. Bei der Aufnahme von schwarzen Objekten sollte beispielsweise eine weiße Fläche als Untergrund gewählt werden und umgekehrt.

## 7 Fazit

Die Hyperspektralkamera der Hochschule Neubrandenburg konnte während des Projektzeitraums soweit eingerichtet werden, dass die Erzeugung von hochwertigen hyperspektralen Aufnahmen problemlos erfolgen kann. Die Beleuchtung durch die Halogenlampen hat sich dabei als die beste Lichtquelle herausgestellt. Die Versuche zur nachträglichen Befreiung der durch diese Beleuchtung verursachten Einflüsse konnten erfolgreich durchgeführt werden, was durch die anschließende Klassifizierung des Aufnahmeobjektes bewiesen wurde.

Außerdem enthält diese Arbeit eine Beschreibung aller benötigten Hardware- und Softwarekomponenten. Sie liefert damit eine grundlegende Einführung in die Arbeit mit der vorliegenden Messvorrichtung.

## 8 Ausblick

Abschließend sollen aufbauend auf dieser Arbeit einige Empfehlungen zu Weiterentwicklung des Projektes gegeben werden.

Empfehlenswert wäre das Testen einer LED Beleuchtung. Insbesondere eine Zeilen-LED-Lampe könnte für diesen Kameraaufbau große Vorteile aufweisen. Diese werden so ausgerichtet, dass nur genau die Zeile des Objektes beleuchtet wird, welche auch gerade aufgenommen wird. Diese präzise Ausrichtung führt zu einer gleichmäßigeren und helleren Ausleuchtung des Objektes. LED's zeichnen sich außerdem durch eine sehr hohe Lebenszeit und geringen Stromverbrauch aus. Auch die Hitzeentwicklung ist geringer als bei Halogenlampen. [9]

Neben „ENVI“ ist die Hochschule Neubrandenburg auch Besitzer einer Lizenz für das

Programm „eCognition“ der Firma Trimble. Hierbei handelt es sich ebenfalls um ein Programm zur Nachbereitung und Auswertung von Fernerkundungsdaten, welches allerdings auf den ersten Blick sehr viel übersichtlicher und moderner aufgebaut ist. Leider können die von „SpectralDAQ“ erzeugten RAW Dateien nicht direkt in „eCognition“ eingelesen werden. Bisher ist es nur gelungen Aufnahmen zuerst mit „ENVI“ in ein anderes Format umzuwandeln (zum Beispiel TIFF) und anschließend einzulesen. Es sollte daher ein Weg entwickelt werden, die Daten ohne den Umweg über „ENVI“ in „eCognition“ verlustfrei einlesen zu können. Anschließend sollten die Möglichkeiten bezüglich Nachbereitung und Analyse erforscht werden.

### **8.1 White-Reference-Ringversuch der DGPF**

Der White-Reference-Ringversuch wurde vom Arbeitskreis Hyperspektrale Fernerkundung der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V. (DGPF) im Jahre 2009 gestartet. Die Idee dabei ist, einen Satz von Kalibrierkörpern nacheinander in allen beteiligten Einrichtungen spektroskopisch zu erfassen und die Ergebnisse anschließend miteinander zu vergleichen. Wie auch aus den hier vor Ort durchgeführten Versuchen hervorgeht, ist die Vergleichbarkeit zwischen erzeugten Spektren und spektralen Bibliotheken nicht immer einfach, da jedes Spektrometer besondere Eigenheiten in jedes Spektrum einfließen lässt [14]. Ein Ziel dieses Ringversuches ist es also, den gleichen Satz Referenzobjekte mit möglichst vielen verschiedenen Spektrometern aufzuzeichnen und zu archivieren. Der verwendete Satz Referenzobjekte besteht zum einen aus weißen, schwarzen und grauen Kalibriertafeln und zum anderen aus einem Chloridkristall. Dieser weist offensichtlich besonders markante spektrale Eigenschaften auf und kann daher ideal für Klassifizierungsversuche verwendet werden.

Die Hochschule Neubrandenburg wird diese Kalibrierkörper in naher Zukunft ebenfalls erhalten. Diese sollten insbesondere für die Wiederholung des in Abschnitt 5.3 beschriebenen Versuchs verwendet werden, da die Kalibriertafeln voraussichtlich wesentlich eindeutiger Reflexionseigenschaften aufweisen werden als das hier verwendete weiße Stück Plastik. Anschließend sollte außerdem der Chloridkristall für weitere Tests der Klassifizierungsmethode verwendet werden.

## Literatur

- [1] Smith, R.; 2006; Introduction to Hyperspectral Imaging with TNTmips
- [2] Spectral Imaging Ltd.; Spectral Cameras;  
<http://www.specim.fi/media/specam-datasheets/spectral-cameras-ver1-10.pdf>
- [3] The Imaging Source; [http://www.theimaging-source.com/downloads/camparawp.de\\_DE.pdf](http://www.theimaging-source.com/downloads/camparawp.de_DE.pdf)
- [4] Philips Lighting; Anhang zum Produktkatalog;  
[http://www.lighting.philips.de/pwc\\_li/de\\_de/connect/tools\\_literature/Assets/BPL\\_Lamp\\_Leucht\\_DE\\_201011/Catalog\\_dede\\_UVPE\\_2010\\_Anhang.pdf](http://www.lighting.philips.de/pwc_li/de_de/connect/tools_literature/Assets/BPL_Lamp_Leucht_DE_201011/Catalog_dede_UVPE_2010_Anhang.pdf)
- [5] Spectral Imaging Ltd.; Technical note TN-0008
- [6] Spectral Imaging Ltd.; Spectral Camera HS Technische Daten;  
<http://www.specim.fi/media/pdf/specam-datasheets/hs-spectral-camera-v1-09.pdf>
- [7] Spectral Imaging Ltd.; Hyperspectral fore lenses;  
<http://www.specim.fi/media/pdf/product-brochures/hyperspectral-fore-lenses-ver7-09.pdf>
- [8] Sandau, R. (Hrsg.); 2005; Digitale Luftbildkamera Einführung und Grundlagen
- [9] Fermum, L.; <http://www.vision-doctor.de/>
- [10] National Instruments; 2004; Camera Link Image Acquisition NI 1428 Datenblatt;  
[http://www.ni.com/pdf/products/us/ni\\_1428.pdf](http://www.ni.com/pdf/products/us/ni_1428.pdf)
- [11] International Commission on Illumination (CIE); Selected Colorimetric Tables D65;  
<http://files.cie.co.at/204.xls>
- [12] Stemmer Imaging;  
<http://www.stemmer-imaging.de/de/pages/service/base.php?item=1100&title=Zeile-f%C3%BCr-Zeile-Qualit%C3%A4t#8>
- [13] PFG 2010/5, 0363-0369; White-reference based post-correction method for multi-source spectral libraries
- [14] DGPF Arbeitskreis Hyperspektrale Fernerkundung;  
<http://www.dgpf.de/neu/dgpf/hyper.htm>

## Abbildungsverzeichnis

1	Grundaufbau von Hyperspektralkameras [2] . . . . .	2
2	Datenaufbau [2] . . . . .	3
3	Kameraaufbau . . . . .	4
4	Hyperspektralkamera „HS“ mit und ohne Gehäuse[7] . . . . .	5
5	Objektiv OLE23 [8] . . . . .	6
6	Drehbarer Stativaufsatz . . . . .	9
7	Würfeldarstellung . . . . .	19
8	Siemensstern . . . . .	20
9	Unterschied vor und nach der Fokussierung . . . . .	21
10	Ausgangssituation . . . . .	21
11	Zielsituation Dunkelbildkalibrierung . . . . .	22
12	Ausgangs- und Zielsituation Hellbildkalibrierung . . . . .	22
13	Intensitätskurve bei 23 cm Abstand . . . . .	23
14	Intensitätskurve bei 27 cm Abstand . . . . .	23
15	Intensitätskurve bei 30,8 cm Abstand . . . . .	24
16	Temperaturverlauf . . . . .	25
17	In etwa erwartetes [10] (links) und erzeugtes (rechts) Spektrum von Halogenlampen . . . . .	27
18	Aufnahmen mit Halogenbeleuchtung . . . . .	28
19	In etwa erwartetes [12] (links) und erzeugtes (rechts) Spektrum des Tageslichts . . . . .	29
20	Aufnahmen bei Tageslicht . . . . .	30
21	In etwa erwartetes [10] (links) und erzeugtes (rechts) Spektrum von Neonlicht . . . . .	31
22	Aufnahmen mit Neonbeleuchtung . . . . .	32
23	In etwa erwartetes [10] (links) und erzeugtes (rechts) Spektrum von Infrarotlicht . . . . .	33
24	Eiche: Spektrum vor Nachbearbeitung (links) und Bibliotheksspektren (rechts) . . . . .	34
25	Spektrum des Eichenblattes nach der Berechnung . . . . .	35
26	Ergebnis der Klassifizierung . . . . .	36
27	Erzeugtes Spektrum Eiche gegenüber Bibliotheksspektrum <i>Leather Oak</i> . . . . .	36
28	Flussdiagramm zu Vorbereitungen, Aufnahme und Nachbereitung . . . . .	38

## **Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit versichere ich, die vorliegende Bachelorarbeit ohne Hilfe Dritter und nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die aus den Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht worden. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Neubrandenburg, den 17.07.2011

Martin Kanning