



Unterrichtsmaterialien zum Thema

Algenblüte im Trinkwasser

JAHRGANGSSTUFE 11–13

Material für Lehrkräfte

Projektinformation

Diese Unterrichtsmaterialien sind im Rahmen des Projektes „Fernerkundung in Schulen“ (FIS) entstanden. Das Projekt FIS wird von der Raumfahrt-Agentur des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen 50EE1703 gefördert. Das übergeordnete Projektziel besteht in der Erarbeitung eines umfassenden Angebots an digitalen Lernmaterialien für den Einsatz im Schulunterricht.

Dieses Angebot umfasst interaktive Lernmodule, sowie Recherche- und Analysetools, die über ein umfassendes und internetgestütztes Lernportal zur Verfügung gestellt werden.

Für dieses Lehrermaterial, die dazugehörige App und Schülermaterial gilt: © Fernerkundung in Schulen (CC BY-NC-ND 2.0 DE)



RUHR
UNIVERSITÄT
BOCHUM



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie



Übersicht

Jahrgangstufe 11 12 13

Niveau ● ● ● ● ●

Zeitbedarf 90 Minuten

Autoren Claudia Lindner,
Arne Dröge-Rothaar,
Robin Schönstein

Ziele

Die Schülerinnen und Schüler (SuS) sollen...

- Hyperspektrale Bilder beschreiben, analysieren und interpretieren,
- spektrale Signaturen und Indizes zur Identifikation von Schwebstoffen nutzen,
- natürliche und anthropogene Veränderungen von Ökosystemen unterscheiden,
- Ökosystem-Veränderungen im Klimawandel diskutieren.

Themen

Algenblüte Wasserverschmutzung

Ökosysteme Umweltverschmutzung

Anthropogene Einflüsse auf die Umwelt

Hyperspektrale Satellitenbilder

Elektromagnetisches Spektrum

Medien & Material

Arbeitsblatt „Algenblüte im Trinkwasser“

Lehrermaterial „Algenblüte im Trinkwasser“

App „Columbus Eye“ – Part „Algenblüte“



DOWNLOAD ON THE
Apple Store



GET IT ON
Google Play



Didaktische Anmerkungen

Vorbereitung

Um die bergartige Struktur der spektralen Signaturen im unteren Wellenlängenbereich besser zu verstehen, wird empfohlen, das Thema „Atmosphärische Streuung“ vorher kurz zu behandeln, beispielsweise mit dem Modul „Streuung & Farben in der Atmosphäre“ auf der Webseite columbuseye.rub.de/unterricht/.

Dieses ist für die Sekundarstufe I konzipiert und kann daher gekürzt durchgeführt werden.

Stundenplanung

Phase 0: (Vorbereitend) Die im Arbeitsblatt genannten Videos auf der Seite <https://esero.de/materialien/lernfilme> sollten von den SuS daheim betrachtet werden, da ihre Dateigröße vergleichsweise hoch ist und die zwei wichtigen Videos zusammen neun Minuten lang sind. Die zusätzlichen, optionalen Videos sind zusammen weitere zehn Minuten lang. Der Zeitungsartikel kann ebenfalls als vorbereitende Hausaufgabe zu lesen aufgegeben werden.

Lassen Sie die SuS die App „Columbus Eye“ einige Tage vor der geplanten Stunde herunterladen. Hierzu kann der Link verschickt, der QR-Code ausgeteilt, oder beim Google Play / Apple App Store in die Suchleiste „Columbus Eye“ eingegeben werden. Der eigentliche Download sollte, um niemandes Datenvolumen zu belasten, von den SuS im heimischen WLAN durchgeführt werden, sofern es kein (zuverlässiges) Schul-W-Lan gibt.

Sobald die App heruntergeladen ist, müssen noch die Daten für den Part „Algenblüte“ hinzugeladen werden.

Hinweis: Möglicherweise funktioniert die App nicht auf allen Smartphones, was mit deren Betriebssystemen und -versionen zusammenhängt. Dies stellt jedoch kein Problem dar. Solange jede Kleingruppe in der späteren Bearbeitung des Arbeitsblattes über ein Smartphone mit funktionierender „Columbus Eye“-App verfügt, können die Aufgaben problemlos durchgeführt werden.

Phase 1: Lesen Sie mit den SuS die Einführung. Dank der Videos sollten alle verstehen, worum es geht. Die SuS sollen in Kleingruppen aufgeteilt werden, von denen jede ein Smartphone mit funktionierender App haben muss. Die Smartphones können bereits benutzt werden. Nach Öffnen der „Columbus Eye“-App und darin des Parts „Algenblüte“ können die SuS ihre Kamera

auf das Bild unter der Einführung und sich ein kurzes Video zu Algenblüten weltweit ansehen, das von der ISS aus aufgenommen wurde.

Phase 2: Für Aufgabe 2 wird nun auf den Bildschirmen das 2D-UI eingeblendet. Die SuS sollen in ihren Kleingruppen gerne einfach vor sich hin probieren und schöne Kanalkombinationen zusammenstellen, bevor sie sich der eigentlichen Aufgabe widmen. Stellen Sie auch die Frage, warum etwas in einer bestimmten Farbe erscheint: Es reflektiert in dem Wellenlängenbereich besonders stark, der über den Regler dieser Farbe zugeordnet ist.

Die Buttons im Bild für die Signaturen sind unsichtbar, um das Bild nicht zu stören, da nahezu das ganze Bild mit ihnen überlagert ist. Wildes Drücken wird die meisten Signaturen bereits offenbaren. Wichtig sind vor allem die grüne und die hellblaue Linie, die sich stark ähneln, und die beiden Algentypen unterscheidet.

Phase 3: Sofern der Zeitungsartikel nicht Teil der vorbereitenden Hausaufgabe war, sollte er jetzt gelesen werden. Die SuS sollten ihn kurz mündlich zusammenfassen. Beide Listen in Aufgabe 3 können nacheinander im Klassenverband an der Tafel erstellt werden.

Aufgabe 4 wird wieder in den etablierten Kleingruppen gelöst. Die Abkürzungen EPA (Environmental Protection Agency) und WHO (World Health Organization) sollen SuS mit Smartphone ruhig schnell recherchieren. Die Ergebnisse werden schließlich im Klassenverband besprochen. Am Ende sollte – ohne Aufgabenstellung – noch einmal von den SuS zusammengefasst werden, was in dem Arbeitsblatt gelernt wurde. Sowohl die Problematik der Algenblüten und, was dagegen unternommen werden muss (inkl. Bekämpfung des Klimawandels), als auch die Anwendung von Satellitendaten, insbesondere Hyperspektraldaten, sollten dabei Erwähnung finden.

Phase 4 (optional): Die Bonusaufgabe ist eine reine Experimentieraufgabe. Während in der RGB-Ansicht nur beispielhafte spektrale Signaturen dargestellt wurden, können hier die Signaturen ALLER Pixel im Bild gezeigt werden, nur in einer anderen Darstellungsart. Die SuS können sich interessante Pixel heraussuchen und auf Gemeinsamkeiten und Unterschiede hin untersuchen. In der App lässt sich der Bildausschnitt vergrößern.

Lösungen

0. Erklären Sie die Begriffe „Mischpixel“ und „spektraler Fingerabdruck“.

Mischpixel sind Pixel, die nicht nur eine Oberfläche bzw. Material abbilden, sondern in dem mehrere Oberflächen enthalten sind, bspw. Pflanzen und Beton. Im Video werden die spektralen Fingerabdrücke über unterschiedliches Absorptions- und Reflexionsverhalten in unterschiedlichen Wellenlängen des elektromagnetischen Spektrums definiert. Jedes Material hat eine eigene solche Reflexionscharakteristik, wodurch verschiedene Materialien anhand ihrer spektralen Fingerabdrücke voneinander unterschieden werden können – sofern das Aufnahmesystem sie genau genug unterscheiden kann.

Das Lexikon der Geographie definiert die hier gemeinte spektrale Signatur als „*Reflexionscharakteristik von Oberflächen in verschiedenen Spektralbereichen in der Fernerkundung. Je höher die spektrale Auflösung eines Fernerkundungssystems ist, um so eindeutiger sind verschiedene Landoberflächen voneinander zu unterscheiden. Oft kommen Signaturen nicht in einer reinen Form im Bild vor (nur Wald, Siedlung oder Wiese) sondern überlagern sich zu Mischsignaturen.*“ (<https://www.spektrum.de/lexikon/geographie/spektrale-signatur/7430>)

Diese Mischsignaturen werden später wichtig. Einerseits enthält jeder Pixel eine Mischung von Signaturen, andererseits enthält auch jede Signatur die atmosphärische Streuung (zu sehen an der bergartigen Form der Signaturen). Kleine Wellenlängen-Abschnitte, in denen die Atmosphäre das Licht stärker absorbiert, sind als kleine Knicke zu erkennen, die alle Signaturen in der späteren Ansicht gemeinsam haben (bspw. bei 519 nm).

Im Wasser ist stets eine Mischung aus verschiedenen Algenarten und sonstigen Schwebstoffen, wie ausgewaschener Boden aus den Flüssen, aber auch Industrieabwässer, enthalten. Die einzelnen Signaturen mischen sich anteilmäßig im Pixel.

1. Video der Algenblüten

Die Algenblüten im Video sind als schwach grüne Wirbel zu erkennen. Die Wirbel entstehen, wenn Wasserströmungen unterschiedlicher Dichte aufeinandertreffen und sich vermischen. Die Dichte ist durch Temperatur und Salzgehalt bestimmt. Die Wasserströmungen bringen aber auch eine unterschiedliche Nährstoffzusammensetzung mit. Die Algen blühen dann bevorzugt in der Strömung, die bessere Bedingungen bietet, und machen die Unterschiede somit sichtbar. Meist ist dies das kalte, nährstoffreiche Wasser, das an Kontinentalhängen aufsteigt.

2. Spektrale Signaturen

a) Finden Sie eine Band-Kombination, die ungefähr ein Echtfarbenbild ergibt.

Farbe	Kanal	Wellenlänge
• Rot	51	639 nm
• Grün	36	553 nm
• Blau	20	461 nm

Ein paar Kanäle höher oder tiefer beim blauen und roten Regler machen nur einen geringen Unterschied, beim Grünen werden jedoch schnell Unterschiede deutlich.

b) Finden Sie alle spektralen Signaturen und ordnen Sie sie ihren Oberflächen zu.

Wichtig ist hier, auf Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Signaturen hinzuweisen, bspw. lokale Maxima und Minima, oder, dass Landflächen im infraroten Bereich stark zurückstrahlen, Wasserflächen jedoch nicht. In der Abbildung ist das „klare“ Wasser eine Referenz für einen der dunkelsten Punkte, die abgebildet sind (aber auch hier sind Algen enthalten). Der Button mit dem Drehpfeil setzt alle Signaturen zurück und kommt zum Einsatz, wenn es vor Signaturen unübersichtlich wird.

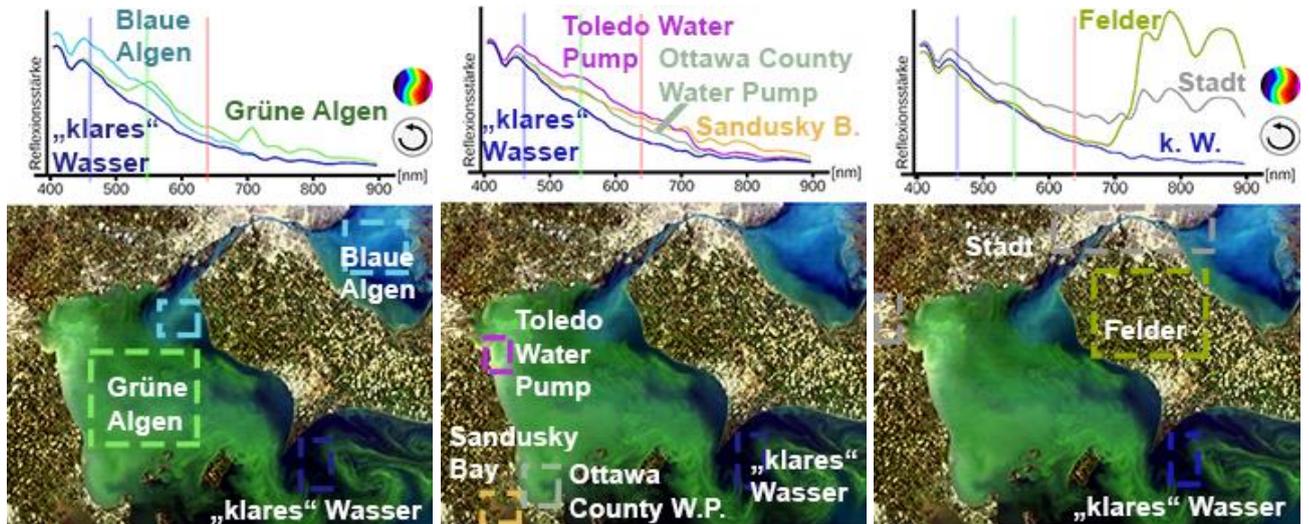


Abbildung 1: Verortung der Buttons zur (De-)Aktivierung der spektralen Signaturen und Zuordnung zu Oberflächen bzw. spezifischen Punkten.

c) Nutzen Sie die Signaturen, um mit den Reglern im 2D-UI nacheinander (1) die nördliche und die südliche Wasserfläche besonders voneinander abzugrenzen, (2) beide Flächen gleich erscheinen zu lassen. Diskutieren Sie die Gründe dafür, dass dies möglich ist.

Die beiden Algensignaturen unterscheiden sich nur abschnittsweise stark und sind in anderen Abschnitten nahezu identisch. Dadurch kann man das Bild auch in eine große oder zwei getrennte Wasserflächen einfärben. Werden die Kanäle so belegt, dass sich die beiden Signaturen an der jeweiligen Wellenlänge kaum unterscheiden, entsteht eine große, gleichmäßige Wasserfläche; wird mindestens eine Farbe an einer Wellenlänge mit großem Unterschied zwischen den Signaturen zugewiesen, sind die zwei Bereiche mehr oder weniger deutlich zu unterscheiden.

Beispiel:

Befinden sich alle drei Farb-Regler zwischen 553 nm und 685 nm bzw. oberhalb von 742 nm sind die beiden Wasserbereiche einfarbig. Sobald ein Regler aus diesem Bereich herausgeschoben wird, beginnen die Bereiche, sich zu unterscheiden. Die beste Unterscheidung lässt sich herausarbeiten, wenn ein Kanal zwischen 450 nm und 524 nm und ein weiterer bei 553 nm eingestellt wird. Die dritte Farbe entscheidet dann nur noch über das Farbbild. Dies liegt an den relativen Reflexionswerten in den beiden Signaturen. Zwischen 450 nm und 524 nm ist die Differenz zwischen hellblauer und grüner Signatur am größten und über den Bereich in etwa gleich, aber bei 533 nm ist sie plötzlich gering und umgekehrt. Dies ist auch bei mehreren kleinen Bereichen in höheren Wellenlängen der Fall, allerdings weisen diese geringere absolute Reflexionswerte auf und sind beim Einfärben daher dunkler dargestellt.

Dies deutet auf ähnliche farbgebende Pigmente im Wasser bzw. in dem im Wasser befindlichen Materialien hin. Hintergrund ist, dass Grünalgen, bei denen es sich um ein- und mehrzellige Pflanzen handelt, als farbgebendes Pigment hauptsächlich Chlorophyll a enthalten, welches für Menschen satt grün aussieht. Blaualgen dagegen, bei denen es sich um Bakterien handelt, enthalten sowohl Chlorophyll a als auch das blau-grüne Pigment Phycocyanin.

3. Folgen, Ursachen und Maßnahmen

Diese Listen erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit – bestimmt fällt Ihren SuS noch mehr ein.

a) Ursachen

Anthropogene Ursachen	Natürliche Ursachen
Einsatz von stickstoff- und phosphorhaltigem Dünger	heftige Unwetter und Regen spülen Dünger in den See
Anbau düngerintensiver Feldfrüchte	darauffolgendes warmes Wetter und schwache Wasserzirkulation regen Algenwachstum an
Einschleppen invasiver Arten, welche die Konkurrenz der Blaualgen fressen (Quagga-Muschel)	
Klimawandel (Zunahme von extremen Wetterereignissen)	

b) Folgen

Mensch	Umwelt
Trinkwasserversorgung gefährdet	Vergiftungen durch Microcystine
Vergiftungen durch Microcystine	
Allergien, Reizungen, Entzündungen	Kippen des Gewässers (Eutrophierung)
kein Fischfang	Dadurch bedingt: Fischsterben
geminderter Freizeitwert (Tourismus wird reduziert/entfällt)	Reduktion der Artenvielfalt

c) Maßnahmen

Kurzfristige Maßnahmen	Langfristige Maßnahmen
Bevölkerung über potenzielle Gefahren und räumliche Verteilung informieren	Anbau von Feldfrüchten, die wenig Dünger benötigen
Bade- und Fischereiverbote	Verwendung von weniger Phosphat- und Nitrathaltigen Düngern
Bei Trinkwasserentnahme aus betroffenen Gewässerabschnitten dieses chemisch und biologisch mit Mitteln, die die Algen abtöten und binden.	Kläranlagen zur Phosphat- und Nitratentnahme
Bei Algen- bzw. Giftkonzentrationen im Trinkwasser, die nicht mehr behandelbar sind, Trinkwasserentnahme stoppen.	Erosionsschutz (bzw. durch Pflugrichtung, zusätzliche Bepflanzung)

Satellitenbilder helfen bei der Überwachung drohender Gefahren und Einhaltung von Schutzmaßnahmen: Wo sind starke Regenfälle zu erwarten, wo wird Dünger ausgewaschen, halten sich die Bauern an die Anbaumaßnahmen (wie Feldfruchtauswahl, Pflugrichtung, Anpflanzen von Wallhecken), ist das Wasser aus der Kläranlage auffällig? Auch bei mittlerer räumlicher Auflösung und Mischpixeln können Satellitenbilder Hinweise geben, wo zusätzliche Proben und Maßnahmen notwendig sind. Die Untersuchung vor Ort ganz ersetzen können sie jedoch nicht.

Im Fall dieser Algenblüte bedeutet das auch, dass Wasser mit hochkonzentrierten Algenteppichen, die oft nur wenige Zentimeter bis Meter breit sind, und Wasser mit nur einer geringen Algen-Konzentration gemeinsam auf nur einem Pixel mit einem Durchschnittswert abgebildet werden.

4. Chlorophyll und Phycocyanin

Die Abbildungen der Algenarten sollen helfen, die zwei Pigmente besser zu unterscheiden und, warum diese Unterscheidung Sinn ergibt. Es handelt sich dabei nicht direkt um Algen aus dieser Untersuchung, sondern die beiden Algen stehen beispielhaft für den Unterschied der Arten.

a) Wieso Hyperspektraldaten zu einem anderen Ergebnis führen können.

Wie im Video erwähnt, können Materialien anhand ihrer spektralen Signaturen besser unterschieden werden, wenn es mehr und schmalere Kanäle gibt. Im Falle von Phycocyanin ist ein lokales Reflexionsminimum von den verwendeten Multispektraldaten der wissenschaftlichen Untersuchung in 2011 gar nicht richtig abgedeckt, sprich, dort ist gar kein Aufnahmekanal. Ein knapp danebenliegender Aufnahmekanal wurde für die Untersuchung in 2016 verwendet, doch in den Hyperspektraldaten von HICO lässt sich dieses Reflexionsminimum genau abbilden und somit die Signatur von Phycocyanin besser identifizieren.

Durch die höhere räumliche Auflösung von rund 100 m gegenüber 300 m sind auch Schlierenbereiche besser abzugrenzen. Für genaue Messwerte wären jedoch eher Bilder mit wenigen Zentimetern Auflösung notwendig.

b) Warnungen für die Punkte in der Karte

Generelle Maßnahmen:

Die Lösungen in dieser Liste sind alle nur ungefähr – die SuS sollen vor allem realisieren, dass die Entscheidung nicht immer einfach ist und, dass schon wenige Pixel im Bild bzw. hundert Meter in der Realität einen großen Unterschied machen können.

Nr.	Ort	Verwendungszweck	Microcystin (Chlorophyll)	Empfehlung	Microcystin (Phycocyanin)	Empfehlung
1	Toledo Water Pump	Trinkwasserentnahme	~ 2 µg, leichte Schlieren	Nicht trinken	~ 2,5 µg, leichte Schlieren	Nicht trinken
2	Sandusky Bay	Naherholungsgebiet	~ 2 µg, keine Schlieren	Nicht trinken	~ 1 µg, keine Schlieren	Kinder < 6 und Risiko nicht ins Wasser wegen Verschluckungsgefahr
3	Point Pelee	Naherholungsgebiet	> 1 µg, nahe Schlieren	Vorwarnen vor nahen Schlieren	~ 2 µg, nahe Schlieren	Schließen
4	Lake St. Clair	Naherholungsgebiet	> 1 µg, keine Schlieren	Keine Maßnahmen	2 – 3 µg, keine Schlieren	Nicht trinken
5	West of Pelee Island	Kommerzielle Fischerei	2 – 3,5 µg, Schlieren	Stoppen	3 – 3,5 µg, Schlieren	Stoppen

Erläuterungen:**Trinkwasser:**

Für die Behandlung von mit Microcystin belastetem Wasser gibt es verschiedene Filtermaßnahmen, die die Blaualgen samt ihrem Gift gründlich entfernen. In Toledo wurde jedoch im Jahr 2011 keine dieser Maßnahmen ergriffen, denn das für das Trinkwasser entnommene Seewasser wird erst seit 2012 auf Microcystin getestet. Im August 2014 wurde dann zum ersten Mal der entsprechende Grenzwert überschritten und die Bevölkerung davor gewarnt, das Wasser zu trinken. Das Wasser wurde mit Chlor und Aluminium behandelt, die zu den Standard-Aufbereitungsmaßnahmen, aber nicht zu den wirkungsvollen Maßnahmen gegen Microcystin zählen. Seitdem wurden jedoch zusätzliche Überwachungsmaßnahmen und Wasseraufbereitungsanlagen – inklusive der wirkungsvollen mechanischen und chemischen Filter – eingesetzt und trotz nahezu jährlicher starker Algenblüten ist keine Belastung im Trinkwasser mehr aufgetreten.

Naherholungsgebiete:

Die Sandusky Bay schließt sich knapp außerhalb des Bildrandes an den Eriesee an, ist jedoch abgeschottet genug, um eine andere Zusammensetzung an Algen hervorzubringen, als der Eriesee selbst. Das Wasser sieht im sichtbaren Licht matschig aus und enthält viel pflanzliches Material, jedoch eher weniger Blaualgen. Die „Rückseite“ von Point Pelee hat wenig Chlorophyll im Wasser aber gut sichtbare Schlieren in der Nähe. Im Phycocyaninbild ist die Grundbelastung um einiges höher, was auch auf giftige Schlieren hinweist. Je nach Windrichtung besteht die Möglichkeit, dass am Tag der HICO-Aufnahme Algenteppiche mit Konzentrationen mit mehreren tausend $\mu\text{g/L}$ am Strand angeschwemmt werden.

Lake St. Clair wird v.a. für Bootsausflüge zum Angeln und Schwimmen genutzt. Die Möglichkeit, dass dabei Wasser geschluckt oder im Anschluss belasteter Fisch gegessen wird, ist zu beachten.

Fischerei:

Während die Algen den Fischen selbst wenige Probleme bereiten, sammeln sie sich in den Tieren an und können so später beim Verzehr von Mensch und Tier aufgenommen werden. Die Konzentration des Giftes im Fisch kann dabei die durchschnittliche Konzentration im Wasser deutlich übersteigen und daher zu gesundheitlichen Problemen führen. Zusätzlich verbrauchen die Cyanobakterien Sauerstoff und andere Nährstoffe, was dann zum Tod der Seebewohner führen kann.

5. Bonusaufgabe: Image Cube**a) Grün- vs. Blaualgen**

An der oberen Bildseite sind Signaturen des grünen Wasserbereichs und des blauen nebeneinander dargestellt. Wie auch in den Linien-Signaturen hat der blaue Bereich im niedrigen Wellenlängenbereich (400-500 nm) eine höhere Reflexion. In dieser Darstellung ist das durch eher orangene denn gelbe Töne aufgezeigt. Auch das kleine lokale Maximum des grünen Bereiches knapp über 700 nm ist auf dem Bild als kleine blaue Linie im lilanen Hintergrund zu erkennen.

b) Beschreibung

An den Rändern ist der gleiche Image Cube wie auf dem Bild zu erkennen. Das eigentliche Bild oben wirkt erstmal chaotisch bunt, aber es ist einfach nur das Graukanal-Bild eines einzelnen Wellenlängen-Kanals. In der RGB-Ansicht kann ein Graustufenbild erzeugt werden, indem alle drei Regler auf die gleiche Wellenlänge eingestellt werden. Dieses wurde dann mit der Skala auf Marker 3 multipliziert. Der Regler mit dem grauen Knopf stellt ein, welches das oberste dargestellte Bild ist. Mit den anderen beiden Doppel-Reglern lassen sich die äußeren Bildgrenzen verschieben, sodass auch in den Cube hineingeschaut werden und jeder einzelne Pixel damit betrachtet werden kann.

c) Weitere Anwendungsgebiete für Hyperspektraldaten

Wie schon im Video zu sehen, kann der Gesundheitszustand von Pflanzen mit Hyperspektraldaten beobachtet werden. Auch verschiedene Pflanzenarten können damit bestimmt werden, zum Beispiel auf den Feldern. Für die Ernährungssicherheit ist dies wichtig, da sowohl Nutzpflanzenarten als auch ihr Zustand in der Fläche bestimmt und somit die voraussichtliche Erntemenge eines Landes schon vor der Ernte berechnet werden kann.

Im Wasser können noch weitere Schwebstoffe unterschieden werden, zum Beispiel das ausgewaschene Bodenmaterial entlang des Süd- und Westufers des Sees, und daraus weitere Parameter der Wasserqualität abgeleitet werden.

In der Stadt können verschiedene Dachbedeckungen unterschieden werden, bspw. um den Anteil an Solaranlagen zu bestimmen. In Hafen- und Industrieflächen können gelagerte Materialien bestimmt und so eventuelle Umweltrichtlinienverstöße aufgespürt werden.

Nicht im Bild sind Anwendungsgebiete der Geologie, bei der einzelne Minerale in Gesteinen gefunden werden können, um Lagerstätten aufzuspüren, oder in der Glaziologie, wo die Herkunft von aufliegenden Materialien mit Hyperspektraldaten bestimmt werden kann (bspw. herabgefallenes Gestein vs. abgelagerte Luftverschmutzung, letztere aus Waldbränden oder Industrieabgasen).