

Validierung von NDVI-Messungen mit einer modifizierten Digitalkamera – Fernerkundung von Vegetation als Thema des Physikunterrichts

Tobias Schüttler*⁺, Raimund Girwidz*, Simone Zepp⁺

*Ludwig-Maximilians-Universität München, Theresienstraße 37, 80333 München
Tobias.Schuetzler@lmu.de und Girwidz@lmu.de

⁺Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Münchnerstraße 20, 82234 Weßling
Simone.Zepp@dlr.de

(Eingegangen: 12.05.2017; Angenommen: 16.11.2017)

Kurzfassung

Die Satellitenfernerkundung ist eine wichtige und überaus vielseitige Disziplin der angewandten Raumfahrtforschung mit großem Einfluss auf unseren Alltag. Während in den letzten Jahren einige Bemühungen zu beobachten waren, das Thema im Geografieunterricht zu etablieren, blieb die „Physik der Fernerkundung“ auf Grund zu teurer und zu komplexer Technik einem direkten Zugang bislang verwehrt. In diesem Beitrag wird daher eine kostengünstige Kameratechnik vorgestellt, die sich dazu eignet, eigene Messungen zur Fernerkundung von Vegetation durchzuführen. Die Daten wurden mit Hilfe von Vergleichsmessungen in einer Feldkampagne validiert. Die Messergebnisse zeigen einen starken linearen Zusammenhang mit den Vergleichswerten eines professionellen Feldspektrometers und belegen, dass es möglich ist, mit dieser Technik qualitativ und quantitativ valide Fernerkundungsmessungen von Vegetation anhand des normalisierten differenzierten Vegetationsindex, NDVI, zu erstellen. Abschließend wird auf konkrete Möglichkeiten zum Einsatz der Technik in Unterrichtsprojekten eingegangen.

Abstract

Satellite remote sensing is an important and very versatile discipline of applied space technologies which has a significant influence on everyday life. Efforts have been made to implement this subject into the syllabus of the school subject geography. However, due to high costs and technological requirements remote sensing has almost never been used as a context for physics teaching so far. In this paper, we therefore propose a cost effective camera technique which can be used to make own remote sensing measurements of vegetation. The measurement results were validated during a field campaign. They show a strong linear relationship with comparative values taken with a professional field spectrometer and thus prove that this technique is suitable for qualitative and quantitative valid NDVI-measurements (NDVI = Normalized Difference Vegetation Index). In conclusion, we make some suggestions for the use of this technique in student projects.

1. Fernerkundung von Vegetation

Fernerkundung bezeichnet das berührungsfreie Messen von physikalischen Parametern über große Distanzen und stellt einen Sammelbegriff für die Technologie der Erdbeobachtung aus dem Weltraum bzw. aus der Luft sowie für Methoden der Verarbeitung der dabei gewonnenen Daten dar.

Durch die Auswertung der emittierten oder reflektierten elektromagnetischen Strahlung können Rückschlüsse auf Struktur und Zusammensetzung der erfassten Oberfläche gezogen werden. Die folgenden Überlegungen beziehen sich auf die Fernerkundung von Vegetation auf der Erdoberfläche, welche ein ganz besonderes Reflexionsverhalten aufweist: Während gesunde Vegetation sichtbares Sonnenlicht größtenteils absorbiert, um damit bei der Photosynthese Energie zu gewinnen, streut sie Strahlung im

infraroten Spektralbereich fast vollständig (Abb. 1). Der Effekt heißt nach seinem Entdecker Wood-Effekt (vgl. Mangold, Shaw & Vollmer, 2013).



Abb. 1: Mit einer für nahes Infrarot modifizierten Digitalkamera erstellte Aufnahme von München

1.1. Der normalisierte differenzierte Vegetationsindex NDVI

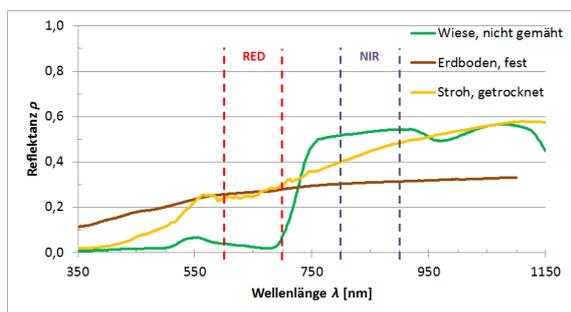


Abb. 2: Reflexionsspektren verschiedener Oberflächen gemessen am DLR Oberpfaffenhofen mit einem professionellen Feldspektrometer

Zur Oberflächenklassifizierung mit Hilfe von Satelliten werden verschiedene Indizes verwendet, die auf dem jeweiligen Reflexionsverhalten der Oberflächen basieren. Diese Indizes ermöglichen quantifizierbare Aussagen. Einer der wichtigsten Indizes für die Analyse von Vegetation ist der sogenannte NDVI (Normalized Difference Vegetation Index, Rouse, Haas, Schell, Deering & Harlan, 1974). Bei der Bestimmung des NDVI macht man sich die oben erwähnte Reflektanz von gesunder Vegetation im nahen IR und die relativ starke Absorption von sichtbarem Licht zunutze. Als Reflektanz ρ bezeichnet man das Verhältnis aus reflektierter zu eingestrahelter Strahlungsintensität, die je nach Oberfläche und Wellenlänge λ unterschiedliche Werte aufweist (Abb. 2).

Der NDVI ist die normierte Differenz der Reflektanzen ρ_{NIR} und ρ_{RED} im nahen Infrarot und im sichtbaren Rot:

$$\text{NDVI} = \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{RED}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{RED}}} \quad \{1\}$$

Derzeit auf Fernerkundungssatelliten eingesetzte Sensoren haben Bandbreiten $\Delta\lambda$ von 10 bis über 100 nm. So wird beispielsweise der NDVI aus Daten des amerikanischen Landsat-7-Satelliten mittels der Kanäle drei (sichtbares Rot, 630 – 690 nm) und vier (sehr nahes IR, 760 – 900 nm) berechnet (Ke, Im, Lee, Gong & Ryu, 2015).

NDVI	Oberfläche
$\text{NDVI} < 0$	Wasser, Schnee, Wolken
$\text{NDVI} \approx 0$	Erdboden
$0 < \text{NDVI} < 0,5$	nicht vitale Vegetation
$\text{NDVI} > 0,7$	vitale Vegetation

Tab. 1: Typische NDVI-Werte von Oberflächen.

Die Graphen und gekennzeichneten Wellenlängenbereiche in Abb. 2 und Gleichung 1 zeigen, dass gesunde Vegetation hohe NDVI-Werte, kranke Vegetation niedrigere und Erdboden NDVI-Werte nahe null haben (Jones & Vaughan, 2010, vgl. Tab. 1).

1.2. Einsatz von NDVI-Falschfarbenaufnahmen zur Klassifikation von Oberflächen

Mit Hilfe von Vegetationsindizes können Satellitendaten großräumig ausgewertet werden, wie das folgende Beispiel zeigt. Im Sommer 2016 standen nördlich der Stadt Nurri auf Sardinien größere Wald- und Buschflächen in Brand. Das Ausmaß der Brände wurde auf Bildern des europäischen Satelliten Sentinel-2 erfasst. Die verbrannten Flächen treten in einem Graustufen-NDVI-Bild als dunkle Bereiche hervor (Abb. 3).

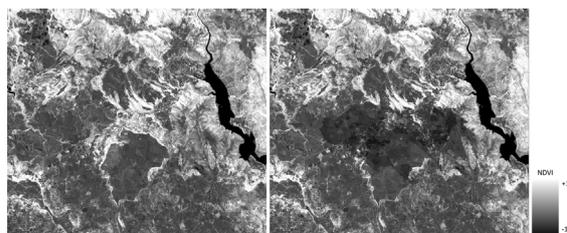


Abb. 3: Graustufen-NDVI-Bild der Waldbrandflächen bei Nurri auf Sardinien, aufgenommen 2016 vor (links) und nach (rechts) dem Brand. Die verbrannten Flächen treten als dunkle Bereiche in der Mitte der rechten Abbildung hervor.

Während die rein visuelle Analyse von Satellitenbildern durch den Menschen immer subjektiv und vor allem aufwendig ist, bieten Indizes wie der NDVI eine Möglichkeit, die verbrannten Flächen quantitativ und objektiv leicht zu erfassen. In Abb. 4 ist ein Differenzenbild der NDVI-Aufnahmen vor und nach dem Brand gezeigt, wobei die Fläche mit großen Differenzen der NDVI-Werte hell hervorgehoben wurde.

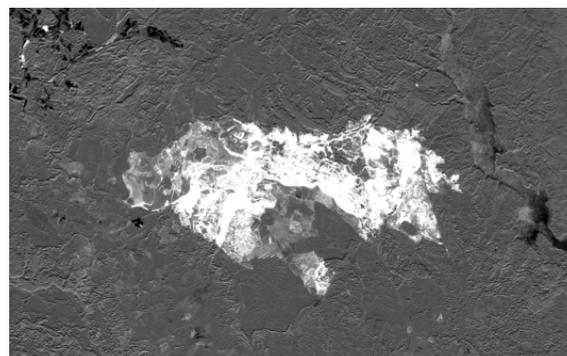


Abb. 4: NDVI-Differenzenbild der Waldbrandfläche bei Nurri. Große Differenzen sind hell hervorgehoben, wodurch sich die verbrannte Fläche deutlich von der Umgebung abhebt.

Das Beispiel zeigt das Potential der Verwendung von speziellen Indizes zur Oberflächenklassifikation: Es können große Flächen nach bestimmten, jeweils relevanten Merkmalen automatisch erfasst und quantitativ klassifiziert werden. Auf diese Weise kann beispielsweise die verbrannte Fläche sehr einfach mit geeigneter Software ermittelt werden.

1.3. Modifikation einfacher Digitalkameras zur Messung von NDVI-Werten

Im Folgenden wird eine Möglichkeit vorgestellt, um eigene NDVI-Messungen mit einer kostengünstigen, modifizierten Digitalkamera durchzuführen. Als Sensor kommt in handelsüblichen Digitalkameras ein lichtempfindlicher CMOS- oder CCD-Chip zum Einsatz. Die Farbinformation erhält das Bild über einen meist direkt auf den Lichtsensor aufgetragenen, so genannten Bayer-Farbfilter (Nakamura, 2016). Dieser bildet ein Mosaik mit den Grundfarben rot, grün und blau, wodurch eine pixelweise Zuordnung der Farbinformation möglich ist. Eine schematische Übersicht gibt Abb. 5.

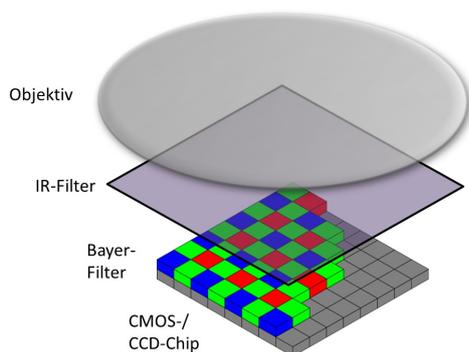


Abb. 5: Typischer Aufbau einer günstigen Digitalkamera. Vor dem Bildsensor aus Bayer-Filter und Lichtsensor (CMOS- oder CCD-Chip) befindet sich ein IR-Sperrfilter.

Die Bildsensoren der meisten Digitalkameras sind auch für Strahlung im nahen IR empfindlich und können durch geringfügige Modifikationen als IR-Sensor verwendet werden (vgl. Girwidz, 2008; Mangold et al., 2013 und Thoms, Colicchia & Girwidz, 2013). Hierzu muss jedoch zunächst der eingebaute IR-Sperrfilter entfernt werden.

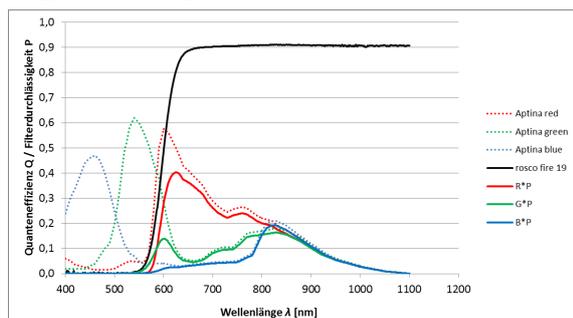


Abb. 6: Quanteneffizienz Q eines Aptina Bildsensors ohne jegliche Filter (gepunktete Graphen) und nur mit Tiefpassfilter (durchgezogene Graphen) für die drei Grundfarben rot, grün und blau. Filterdurchlässigkeit P des Tiefpassfilters „fire 19“ der Firma Rosco.

Zur Vegetationsanalyse mit dem NDVI ist zudem eine Kanaltrennung von sichtbarem roten Licht und nahem IR erforderlich (vgl. {1}). Dies wird durch den Einsatz spezieller, infrarotdurchlässiger Tiefpassfilter erreicht (Rabatel, Gorretta & Labbé, 2011).

Die gestrichelten Graphen in Abb. 6 zeigen die Quanteneffizienz des Bildsensors Aptina AR 0330 ohne IR-Sperrfilter für die drei Grundfarben im sichtbaren Licht und nahen IR. Zur Modifikation der Quanteneffizienz wird anstelle des Infrarotsperrfilters der Tiefpassfilter „fire 19“ der Firma Rosco mit der in Abb. 6 dargestellten Filterdurchlässigkeit eingesetzt. Wie die durchgezogenen Graphen in Abb. 6 zeigen, wird dann auf dem blauen Bildkanal B*P fast nur noch IR-Strahlung und auf dem roten Bildkanal R*P in erster Linie sichtbares rotes Licht (und etwas IR) detektiert. Der grüne Bildkanal wird beim hier vorgestellten Verfahren nicht genutzt. Somit kann auf einfache Weise die geforderte Kanaltrennung von sichtbarem roten Licht und nahem IR technisch realisiert werden.

Die beschriebene Technik findet seit einigen Jahren Anwendungen in der Forschung und der Praxis. Es gibt bereits verschiedene Firmen, die entsprechend modifizierte Kameras anbieten oder eigene Digitalkameras von Kunden umrüsten (vgl. Nijland, De Jong, De Jong, Wulder, Bater, & Coops, 2014). Die quantitative und qualitative Aussagekraft solcher Aufnahmen ist Forschungsgegenstand verschiedener Studien. Montiert man solche umgerüsteten Kameras auf unbemannte, ferngesteuerte Fluggeräte (UAVs), erhält man einfache und kostengünstige Sensorsysteme zur kleinräumigen Fernerkundung.

Allerdings sind die bisherigen Studienergebnisse widersprüchlich. Nijland et al. (2014) konnten in einem eher kleinräumigen, aber gut kontrollierten Laborsetting keine Vorteile dieser Kameratechnik gegenüber der Bildauswertung von nicht modifizierten Kameras finden. Dagegen zeigten andere Studien (Primicerio et al., 2012; Rabatel, Gorretta & Labbé, 2012; Bueren, Burkart, Hueni, Rascher, Tuohy & Yule, 2015 sowie Rasmussen et al., 2016) gewisse Vorteile des Einsatzes von UAVs bei der Untersuchung von Vegetation. Bueren et al. (2015) fassen zusammen, dass „*at this stage, this study can only suggest that the sensor might be used for support of visual paddock assessment and broadband vegetation indices.*“

Insbesondere die letztgenannte Aussage zu breitbandigen Vegetationsindizes stimmt zuversichtlich, dass mit einer modifizierten Digitalkamera im Physikunterricht Daten ausreichender Validität zur Fernerkundung von Vegetation gewonnen werden können.

2. NDVI-Messungen mit einer modifizierten Mobius-ActionCam als Fernerkundungssensor

Für einen Einsatz in Schulen kommt neben den Anforderungen an die Validität der Daten noch ein gewisser Anspruch an die Einfachheit der Bedienung, Verfügbarkeit im Handel und letztlich auch an den Preis der Kamera hinzu. Das im Rahmen dieser Arbeit getestete System setzt mit Blick auf diese Randbedingungen als Fernerkundungssensor eine modifizierte Mobius-ActionCam ein (www.mobius-

actioncam.com¹). Diese Kamera ist mit etwas über 60 € sehr günstig, sehr klein und mit einer Masse von nur etwa 40 g Masse auch sehr leicht. Die Bedienung geschieht einfach über zwei Knöpfe, und es besteht die Möglichkeit, die Kameraeinstellungen mit der kostenlosen Software mSetup zu ändern (www.mytempfiles.info/mobius).

2.1. Umbau der Mobius-ActionCam zur NDVI Kamera

Über den konkreten Einsatz der Mobius-Kameras im Unterricht und über die Validität der damit gewonnenen Aufnahmen liegen bislang noch keine Berichte vor. Es gibt jedoch für die Modifikation der Kamera ein gut nachvollziehbares Tutorial im Internet (publiclab.org). Die in 1.3 beschriebene Modifikation der Kamera ist einfach und ohne Spezialwerkzeug und Spezialkenntnisse durchführbar (vgl. Abb. 7). Zudem kann im Onlineshop der oben genannten Internetseite auch eine fertig modifizierte, komplette Kamera, ein modifiziertes Objektiv oder lediglich ein Umrüstfilterset günstig erworben werden. Insgesamt besteht so die Möglichkeit, eine modifizierte Mobius-Kamera für deutlich unter 100 € zu erhalten. Professionell umgerüstete, bereits fertig auf entsprechenden Fluggeräten montierte Kameras sind mit Preisen ab etwa 1 500 Dollar deutlich teurer und damit für schulische Zwecke kaum geeignet – insbesondere wenn mehrere Schülergruppen mit einer eigenen Kamera experimentieren sollen.



Abb. 7: Umbau der Mobius-Kamera. Nach dem Entfernen des IR-Filters (im kreisrunden Ring), wird dieser durch den roten Tiefpassfilter ersetzt.

Als Trägerplattform kam bei den im Folgenden beschriebenen Messungen ein handelsüblicher Quadrocopter „DJI Phantom 3 Standard“ zum Einsatz. (www.dji.com/phantom-3-standard). Dieser kostet zwar mit etwa 500 € deutlich mehr als die Mobius-Kamera, oft findet sich aber ein solches oder ein ähnliches Gerät im Privatbesitz eines Schülers. Die technischen Anforderungen an den Quadrocopter sind nicht groß: Er muss letztlich nur in der Lage sein, die Kameras zu tragen. Hilfreich für die Aufnahme der Bilder ist eine Stabilisierung

der Fluglage und -position über entsprechende Sensoren (GPS, Beschleunigung und Rollrate). Ohne diese Sensoren ist die Steuerung des Quadrocopters sehr anspruchsvoll, wodurch es schwierig ist, sich auf die Erstellung der Aufnahmen zu konzentrieren. Die Kamera kann am Landegestell mit Klebeband befestigt werden. Zuvor wird sie so programmiert, dass sie in festen Zeitabständen Einzelbilder aufnimmt.

Wie Abb. 8 zeigt, erscheint Vegetation auf den Aufnahmen der modifizierten Kamera in hellblau. Dies entsteht durch die hohe Reflektanz von Pflanzen im nahen IR. Durch die Modifikation der Kamera wird die Infrarotinformation auf dem blauen Bildkanal gemessen (vgl. Abb. 6), sodass die hellblaue Färbung für starke Infrarotreflektanz steht. Um aus diesen Bildern NDVI-Werte zu berechnen, kann die für Ausbildungszwecke von der europäischen Raumfahrtagentur ESA entwickelte, kostenlose Software LEOWorks verwendet werden (leoworks.terrasigna.com). Die Erstellung eines NDVI-Falschfarbenbildes ist damit einfach realisierbar.



Abb. 8: Aufnahme einer landwirtschaftlichen Fläche aus 200 m Höhe mit einer handelsüblichen (links) und mit einer IR-modifizierten Mobius-Digitalkamera (rechts).

Abb. 9 zeigt das auf Basis von Abb. 8 mit LEOWorks erstellte NDVI-Bild. Flächen mit hohen NDVI-Werten, wie z. B. Wiesen, sind grün, Flächen mit niedrigen NDVI-Werten, wie z. B. Straßen und Wege, sind hellbraun dargestellt. Allerdings haben z. B. Grasflächen einen NDVI-Wert von nur ca. 0,25, der deutlich kleiner ist als der in Tab. 1 angegebene Literaturwert von mindestens 0,7.



Abb. 9: NDVI-Falschfarbenbild einer Aufnahme mit der modifizierten Mobius-Kamera. Zur Validierung der Messwerte wurden Geländepunkte (Targets, rote Kreuze) mit unterschiedlichen NDVI-Werten ausgewählt.

¹ Alle im Text genannten Internetseiten wurden zuletzt abgerufen am 20.07.2017

2.2. Validierung der NVDI-Messungen mit einem Feldspektrometer

Zur Untersuchung der zu niedrigen, fehlerhaften NVDI-Werte führten die Autoren im Juli 2016 eine Feldmesskampagne durch. Die Messprozedur orientierte sich dabei an einer ähnlichen Studie zur Validierung der Messwerte einer professionellen NDVI Kamera (Primicerio et al., 2012).

2.2.1. Messverfahren und Ergebnisse

Als Vergleichsmessgerät wurde ein professionelles, tragbares Feldspektrometer (ASD FieldSpec® 3) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt verwendet. Dieses verfügt über eine hohe spektrale Auflösung von 3 nm im Wellenlängenbereich von 350 – 2500 nm, ist aber nur für Punktmessungen von Reflexionsspektren wie in Abb. 2 und nicht zur Bilderstellung geeignet. Abb. 9 zeigt Geländestellen (Targets), die so ausgewählt wurden, dass möglichst unterschiedliche Vegetationszustände und -formen mit unterschiedlichen NVDI-Werten abgedeckt wurden.

Das Spektrometer wurde vor jeder Messung mit Hilfe eines sogenannten Spectralons als Weißreferenz auf die jeweilige Beleuchtungssituation kalibriert. Anschließend wurden damit für jedes Target aus etwa einem Meter Höhe je drei Hyperspektral-messungen durchgeführt und der Mittelwert dieser drei Messungen gebildet. Aus den so erhaltenen, gemittelten Reflexionsspektren wurden nach {1} NDVI-Werte berechnet. Für die Reflektanz im sichtbar roten Licht, ρ_{RED} , wurde über einen Wellenlängenbereich von 600 – 700 nm gemittelt. Die IR-Reflektanz, ρ_{NIR} , wurde als Mittelwert der Reflektanzen im Bereich von 800 – 900 nm bestimmt.

Target	Oberfläche	ASD	Mobius
1a	Gemisch: Weg + (viel) Gras	0,43	0,07
1b	Gemisch: Weg + (wenig) Gras	0,2	0,03
1c	Weg	0,07	-0,04
2	Saftige Wiese	0,90	0,21
3	Abgemähtes Feld, schwacher Bewuchs	0,52	0,03
4a	Saftige Wiese neben Baum	0,89	0,21
4b	Saftige Wiese im Schatten des Baumes	0,94	0,27
5	Trockenes Stroh (geerntetes Getreidefeld)	0,26	0,04
6	Rand Gerstenfeld, braun	0,53	0,09
7	Gerstenfeld, größtenteils braun	0,52	0,10
8	Rand Weizenfeld, braun	0,29	0,04
9	Gemähte Wiese	0,7	0,14

Tab. 2: NDVI-Werte der Messungen mit dem ASD-Feldspektrometer und der modifizierten Mobius-Kamera.

Parallel wurden an allen Targets mit der am Quadrocopter befestigten, modifizierten Mobius-Kamera aus zwei Metern Höhe über Grund Aufnahmen gemacht. Die NDVI-Werte für die Mobius-Aufnahmen wurden mit Hilfe von LEOWorks als Mittelwerte über alle Einzelpixel eines für das Tar-

get repräsentativen Bildausschnitts berechnet. In Tab. 2 sind die NVDI-Werte für die gewählten Targets bzw. Oberflächen angegeben.

Zur Veranschaulichung des Zusammenhangs zwischen den verschiedenen NDVI-Werten wurden die Werte der Mobius-Kamera in einem Diagramm (Abb. 10) gegen diejenigen des ASD-Feldspektrometers aufgetragen.

2.2.2. Auswertung und Interpretation der Ergebnisse

Abb. 10 zeigt einen in guter Näherung linearen Zusammenhang zwischen den NDVI-Werten des Spektrometers und denen der Mobius-Kamera. Eine lineare Regression ergibt die Regressionsgerade $y = 0,302x - 0,0579$ ($R^2 = 0,91$). Auffällig ist, dass die Regressionsgerade nicht durch den Ursprung verläuft, sondern einen Offset von $-0,0579$ aufweist. Dieser entsteht durch die unzureichende Kanaltrennung des roten und des IR-Kanals (vgl. Abb. 6 und Abschnitt 2.3).

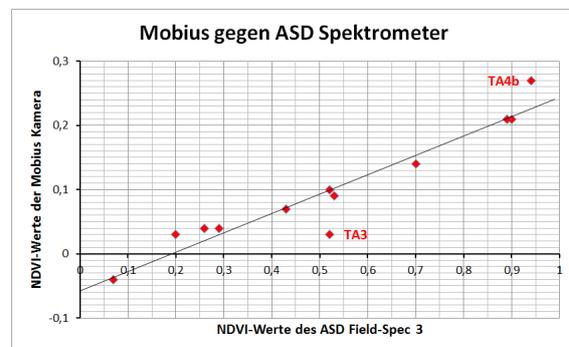


Abb. 10: Zusammenhang der NDVI-Werte des ASD-Spektrometers und der modifizierten Mobius-Kamera. Die Wertepaare liegen in guter Näherung auf einer Geraden. Der Offset von $-0,0579$ entsteht durch die unzureichende Kanaltrennung des roten und des IR-Kanals.

Weiterhin fallen zwei starke Ausreißer auf (Ta3 und Ta4b). Diese können mit Abb. 11 erklärt werden.

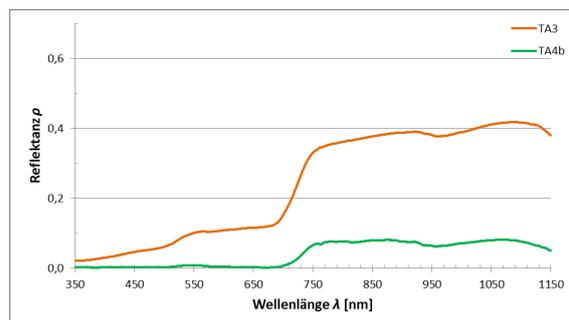


Abb. 11: Mit dem ASD-Feldspektrometer gemessene Reflexionsspektren der Targets TA3 und TA4b

Das Spektrum von Target 3 zeigt einen deutlichen Anstieg der Reflektanz bei etwa 680 nm, was auf die Messung von photosynthetisch aktiver Vegetation hinweist (vgl. Abb. 2). Die Messumgebung bestand in diesem Fall aus einem abgemähten Feld mit vereinzelt schwachem Bewuchs. Die punktuellen Messungen mit dem Spektrometer fanden offensichtlich

bevorzugt an Stellen mit Bewuchs statt. Die NDVI-Darstellung aus den Mobius-Messungen (Abb. 12) zeigt hingegen das gesamte Messfeld, bei dem der Bewuchs (grün dargestellt) nur einen geringen Anteil einnimmt. Also sind die mit dem Spektrometer gemessenen NDVI-Werte vergleichsweise zu hoch.

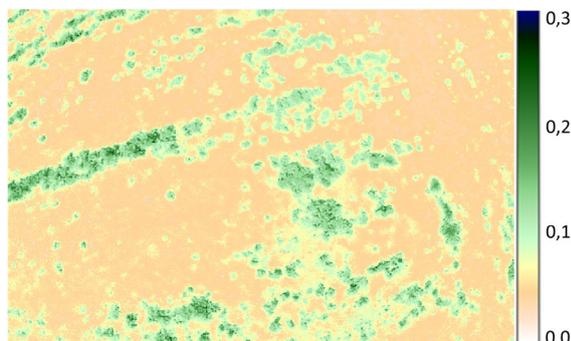


Abb. 12: NDVI-Falschfarbenbild von TA3 gemessen mit der Mobius-Kamera

Bei Target 4b handelte es sich um eine Wiese im Schatten eines Baumes. Bereits der Weißabgleich des Spektrometers war hier schwierig durchzuführen, da kaum beständige Beleuchtungsverhältnisse zu erreichen waren. Der qualitative Verlauf des Reflexionsspektrums in Abb. 11 passt zur untersuchten Oberfläche (z. B. typischer Anstieg der Reflektanz bei etwa 680 nm), die gemessenen Reflektanzen sind jedoch durchgehend zu niedrig. In der Mobius-Aufnahme desselben Ausschnitts (Abb. 13) ist zu erkennen, dass die gemessenen NDVI-Werte größtenteils an der oberen Grenze der Mobius-NDVI-Werte um 0,3 liegen.

Vergleicht man die NDVI-Falschfarbenaufnahme mit einem zeitgleich im sichtbaren Licht aufgenommenen RGB-Bild, so wird ersichtlich, dass die NDVI-Werte im Schatten offenbar überschätzt werden: Da die Wiese in beiden Fällen (im Licht und im Schatten) nahezu identisch ist, sollten sich auch die zugehörigen NDVI-Werte nicht unterscheiden.

Die in Abb. 13 dargestellten NDVI-Werte werden im Schattenbereich über- in der Sonne hingegen unterschätzt. Um diesen Effekt besser zu verstehen, wurden für den Bildausschnitt von Abb. 13 die Pixelwerte des roten und des infraroten (vorher blauen) Bildkanals miteinander verglichen. Dabei war zu beobachten, dass die Werte des IR-Kanals im sonnenbeschienenen Bereich fast durchgängig nahe der Überbelichtungsgrenze (Pixelwerte ≥ 250 von 255) liegen. Der IR-Kanal ist demnach durch die intensive Reflexion in diesem Wellenlängenbereich überbelichtet, wodurch für ρ_{NIR} und damit auch für den nach $\{1\}$ berechneten NDVI effektiv zu niedrige Werte gemessen werden.

Im Schattenbereich hingegen zeigt die Analyse der Pixelwerte für den roten und den IR-Kanal eine größere Differenz $\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{RED}}$. Auf Grund der Schattensituation und der damit verbundenen geringen Helligkeit ist hier jedoch die Summe $\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{RED}}$ und

damit der Nenner in $\{1\}$ zu klein, woraus die zu großen NDVI-Werte im Schatten resultieren. Da die Anpassung der Sensorempfindlichkeit (Helligkeitsanpassung) immer für den gesamten Sensor und nicht für einzelne Ausschnitte erfolgt, können mit der Mobius-Kamera von Bereichen mit Licht und Schatten keine validen NDVI-Aufnahmen erstellt werden. Es muss daher bei der Aufnahme auf gleichmäßige Beleuchtungsverhältnisse möglichst ohne Schatten geachtet werden.

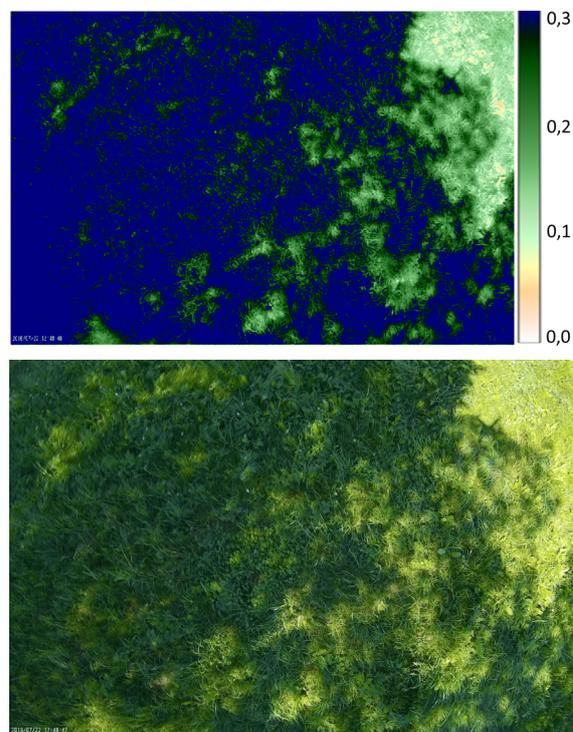


Abb. 13: NDVI-Falschfarbenbild von TA4b (oben) und RGB-Echtfarbenbild derselben Szene (unten). Die Schattenbereiche weisen deutlich höhere NDVI-Werte auf als die von der Sonne beschienenen Flächen.

Dieses hier nur kurz skizzierte Problem ist auch in der Satellitenfernerkundung bekannt (Jones & Vaughan, 2010). Nachdem Satellitenbilder meist eine deutlich geringere räumliche Auflösung haben als die von uns erstellten, und die Bilder außerdem üblicherweise senkrecht von oben aufgenommen werden, fallen Schatteneffekte nur beim direkten Vergleich von Daten mit unterschiedlich hoher Auflösung stärker ins Gewicht (Jiang et al., 2006). Insbesondere bei räumlich sehr hoch aufgelösten Satellitendaten werden die Effekte von Schatten auf Vegetationsindizes jedoch zunehmend bedeutsam und. Sie sind daher Bestandteil aktueller Forschung (Zhang, Sun, Wu & Zhang, 2015).

2.3. Möglichkeiten und Grenzen der vorgestellten Technik

Unsere Messungen zeigen einen in guter Näherung linearen Zusammenhang zwischen den NDVI-Werten des ASD-Spektrometers und der Mobius-Kamera. Entfernt man die beiden thematisierten Messausreißer, ist der Zusammenhang noch stärker

($R^2 = 0,98$). Es ist also möglich, mit Hilfe dieses kostengünstigen und einfachen Messsystems valide NDVI-Daten zu erhalten. Kritisch zu beurteilen sind Messergebnisse von Oberflächen, bei denen Teile im Schatten liegen und andere direkt von der Sonne angestrahlt werden. Diese Aussage ist jedoch wie beschrieben auch für Satellitendaten und Messwerte anderer Sensoren gültig und stellt daher keine für das hier vorgestellte Kamerasystem spezifische Einschränkung dar.

Die zu kleinen NDVI-Werte der Mobius-Kamera sind wohl in erster Linie auf die zu geringe Schärfe der Trennung des roten und des infraroten Kanals zurückzuführen: Wie die Graphen in Abb. 6 zeigen, überlappt sich der rote mit dem infraroten (zuvor blauen) Kanal. Dies führt zur systematischen Überschätzung der Reflektanz im Roten ρ_{RED} , wodurch zu kleine Differenzen $\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{RED}}$ und zu kleine NDVI-Werte entstehen. Die Werte sind einerseits hin zu negativen NDVI-Werten verschoben (Offset), andererseits gestaucht.

Um mit einer modifizierten Mobius-Kamera nicht nur relativ, sondern auch absolut korrekte NDVI-Werte zu erhalten, müssen die Messungen zur Anpassung an die Lichtverhältnisse kalibriert werden. Zu einfachen und kostengünstigen Kalibrierungsverfahren werden derzeit Überlegungen angestellt.

3. Fernerkundung von Vegetation im Physikunterricht

Die vorgestellte Technik liefert unter bestimmten Voraussetzungen valide Messergebnisse und eröffnet damit die Möglichkeit, Fernerkundungsmissionen im Rahmen des Physikunterrichts durchzuführen. Auf der Seite publiclab.org wird ein Unterrichtsgang mit Mobius-Kameras vorgestellt. Dieser in englischer Sprache verfasste Beitrag befasst sich jedoch in erster Linie mit der konkreten Umrüstung und der Technik von IR- und NDVI-Kameras und liefert nahezu keine Erklärungen der physikalischen Zusammenhänge. Über Erfahrungen mit diesem Unterrichtsgang in der Praxis finden sich keine Berichte.

Darüber hinaus liegen derzeit keine weiteren Vorschläge zum Einsatz dieser Technik im Unterricht vor, weshalb im Folgenden hierzu abschließend einige Überlegungen angestellt werden sollen.

3.1. Fernerkundung als sinnstiftender Kontext eines fächerübergreifenden Unterrichts

Eine ganze Reihe von Argumenten, insbesondere die Möglichkeit bei Schülerinnen und Schülern Interesse zu wecken und die Lernmotivation zu steigern, sprechen für einen fächerübergreifenden und kontextorientierten naturwissenschaftlichen Unterricht (Duit & Mikelskis-Seifert, 2010; Labudde, 2014). Watzka & Girwidz (2015) konnten zudem nachweisen, dass das Lernen in einem als authentisch wahrgenommenen Kontext dem Abfall der Transferleistung von Handlungswissen entgegenwirkt.

Die Fernerkundung verbindet auf ganz natürliche Weise verschiedene Fachdisziplinen der Naturwissenschaften wie beispielsweise Luft- und Raumfahrttechnik, Physik, Datenverarbeitung, Geografie und Ökologie. Sie ist zudem ein modernes und sehr dynamisches Forschungsgebiet und darüber hinaus von großer Bedeutung für unseren Lebensalltag. Die Anwendungen reichen dabei von der Erstellung präziser Karten über die Analyse von Ökosystemen bis hin zur Untersuchung des Klimawandels und den sich daraus ergebenden Problemen, wie Gletscherrückgang, Wassermangel und Naturkatastrophen (vgl. UBA, 2017). Auf Grund der Vielfalt möglicher Alltagsbezüge kann die Satellitenfernerkundung demnach als sinnstiftender Kontext für naturwissenschaftlichen Unterricht angesehen werden.

Entsprechend sind seit einigen Jahren Bemühungen zu beobachten, das Thema im Schulunterricht zu implementieren (z. B. Reuschenbach, 2007; Rienow, Hoda & Voß, 2015; Viehrig, 2015 und Danner & Schüttler, 2017). Überwiegend orientieren sich diese jedoch bisher am Geografieunterricht, und damit an der Nutzung und Anwendung von Fernerkundungsdaten.

4. Physikalische Fachinhalte und Kompetenzen

Die für die Fernerkundung wichtigen physikalischen Fachinhalte sind sehr vielfältig. Mit Blick auf ihre Relevanz für die Lehr- und Bildungspläne der meisten Bundesländer erscheinen jedoch drei Themengebiete besonders bedeutsam:

Strahlungsphysik: Satellitenfernerkundung findet in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen des elektromagnetischen Spektrums statt. UV-Messungen liefern beispielsweise Informationen über den Zustand der Ozonschicht. Im sichtbaren Licht entstehen Aufnahmen, die beispielsweise als Datengrundlage für Dienste wie Google Maps dienen. Der infrarote Spektralbereich, vom nahen IR (NIR) über das so genannte ‚short wave infrared‘ (SWIR) bis zum thermalen IR (TIR), ist von großer Bedeutung für die Klassifikation von Oberflächen (NIR und SWIR) und die großräumige Messung von Temperaturen (TIR), beispielsweise zur in-situ-Analyse von Waldbränden.

Die genannten Kontexte können einen motivierenden Rahmen für die zugrundeliegenden physikalischen Inhalte wie elektromagnetische Wellen, Spektren und Spektroskopie bilden. Die vorgestellte Technik eignet sich beispielsweise auch, um Gemeinsamkeiten und Unterschiede von sichtbarem Licht und Infrarotstrahlung zu thematisieren.

Energie-Materie-Wechselwirkung: Alle Messungen der Fernerkundung basieren auf der Interaktion von elektromagnetischer Strahlung mit Materie. Für schulische Belange erscheint insbesondere auch die bei der Atmosphärenfernerkundung untersuchte Wechselwirkung von Strahlung mit bestimmten, einfachen Molekülen wie CO_2 oder Ozon interes-

sant, da ihre physikalische Beschreibung noch vergleichsweise einfach ist. Das Reflexionsverhalten von Vegetation, das hier im Blickpunkt steht, ist zwar deutlich komplexer, folgt aber letztlich den gleichen Gesetzmäßigkeiten. Der aus dem Biologieunterricht bekannte Photosyntheseprozess kann in diesem Zusammenhang aus physikalischer Sicht thematisiert werden und bietet einen guten Anknüpfungspunkt für fächerverbindenden Unterricht.

Halbleitertechnik: Um die Funktionsweise der modifizierten Mobius-Kameras zu verstehen, ist eine Auseinandersetzung mit der Technik digitaler Bildsensoren erforderlich. In diesem Zusammenhang sei nochmals auf einen großen Vorteil des hier vorgestellten Systems hingewiesen: Der Umbau der Kamera ist so einfach, dass er von Schülern selbst durchgeführt werden kann. Diese haben somit die Möglichkeit, sich mit „ihrem eigenen“ Halbleitersensor auseinanderzusetzen.

Über die Vermittlung von Fachinhalten hinaus kann die vorgestellte Technik auch zur Förderung weiterer Kompetenzen (KMK, 2004) genutzt werden. So besteht beispielsweise die Möglichkeit, im Rahmen eines Fernerkundungsprojektes die Vegetation der eigenen Umgebung zu analysieren. Hierzu ist eine anspruchsvolle Planung der Messkampagne vor der eigentlichen Durchführung der Messungen selbst erforderlich. Die Auswertung der Ergebnisse unter Verwendung entsprechender Darstellungsformen, wie Falschfarbenabbildungen und Diagrammen, kann dank entsprechender Software ebenfalls von den Schüler/innen selbst bewerkstelligt werden. Und schließlich müssen die Fernerkundungsaufnahmen von den Schüler/innen bezüglich ihrer Validität und ihres Informationsgehaltes kritisch bewertet, mit anderen Daten verglichen und mit ihren Mitschülern und Lehrern diskutiert werden. Für den Kompetenzbereich „Bewerten und Beurteilen“ bieten zudem die oben ausgeführten Überlegungen zur Messgenauigkeit der verwendeten Sensoren reichhaltige Anknüpfungsmöglichkeiten.

4.1. Erfahrungswerte mit einem Schülerprojekt

Die Technik wurde bereits bei einem internationalen Kooperationsprojekt zur Fernerkundung mit Oberstufenschülern aus Israel und Deutschland erfolgreich eingesetzt (Schüttler & Girwidz, 2017). Dabei zeigten die Jugendlichen große Bereitschaft, sich auch außerhalb der Schulzeit intensiv mit der Aufgabe zu befassen, was auf die motivierende Wirkung des Themas hinweist. Die Durchführung eigener Fernerkundungsprojekte erscheint aufgrund der Anforderungen besonders geeignet für Oberstufenkurse. Ein entsprechendes Unterrichtskonzept, bei dem die Satellitenfernerkundung als sinnstiftender und motivierender Kontext zur Vermittlung der oben angesprochenen Fachinhalte und Kompetenzen genutzt wird, ist Gegenstand aktueller Forschungsvorhaben.

Für Schülerprojekte erscheint zudem die Möglichkeit, die Kameras mit Wetterballons in deutlich größere Höhen zu befördern, besonders attraktiv (Abb. 14). Derzeit führt der Lehrstuhl für Didaktik der Physik der LMU München im Rahmen des SatTec-Projektes (www.sattec.org) unter anderem zu dieser Thematik einen bundesweiten Schülerwettbewerb durch.

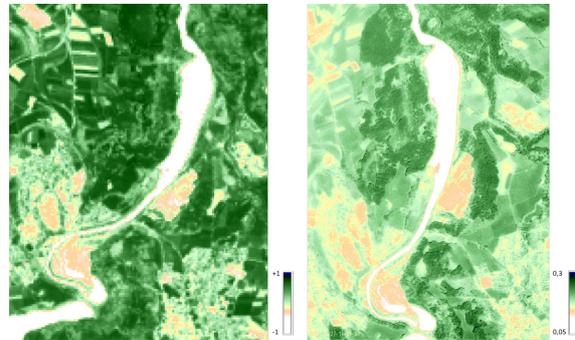


Abb. 14: Vergleich von NDVI-Falschfarbenbildern basierend auf Landsat-7-Daten (links) und einer Mobius-Aufnahme (rechts), aufgenommen aus 10 km Höhe vom Wetterballon aus. Der direkte Vergleich zeigt eine hohe qualitative Übereinstimmung der Daten.

Wenn man den Aufstiegszeitpunkt eines solchen Wetterballons zeitlich mit dem Überflug eines Fernerkundungssatelliten wie Landsat oder Sentinel koordiniert, besteht die Möglichkeit, die selbst erstellten Fernerkundungsaufnahmen direkt mit echten Satellitenbildern zu vergleichen. Die Überflugzeiten der Satelliten sind im Internet zu finden und ihre Daten frei zugänglich. Abb. 14 zeigt zwei Aufnahmen, die auf diese Weise nahezu zeitgleich erstellt wurden. Zu sehen ist eine Staustufe des Lechs mit den Orten Schongau und Peiting, links bzw. rechts des Flusses. Als Grundlage dienten beim linken Bild Landsat-7-Daten, beim rechten mit einer modifizierten Mobius-Kamera von einem Wetterballon aus gemachte IR-Aufnahmen. Die NDVI-Werte sind qualitativ sehr ähnlich – ein durchaus bemerkenswertes Ergebnis, wenn man sich vor Augen hält, mit welcher einfacher Technik das rechte Bild erstellt wurde.

5. Literatur

- Von Bueren, S. K., Burkart, A., Hueni, A., Rascher, U., Tuohy, M. P. & Yule, I. J. (2015). Deploying four optical UAV-based sensors over grassland: challenges and limitations. *Biogeosciences*, 12(1), 163.
- Danner, M. & Schüttler, T. (2017). Rückgang der alpinen Vergletscherung. Das Beispiel der Ötztaler Alpen. *Praxis Geographie*, 46(9), 4-9.
- Duit, R. & Mikelskis-Seifert, S. (2010). Piko-Brief Nr. 5 Kontextorientierter Physikunterricht. Duit, R.: Piko-Briefe –Der fachdidaktische Forschungsstand kurzgefasst, [http://www.ipn.unikel.de/de/das-](http://www.ipn.unikel.de/de/das-ipn/abteilungen/didaktik-)

derphysik/piko/pikobriefe032010.pdf – abgerufen am 20.07.2017.

Girwidz, R. (2008). Berührungslose Temperaturmessung im Physikunterricht. *PhyDid A-Physik und Didaktik in Schule und Hochschule*, 1(7), 01-08.

Jones, H. & Vaughan, R. (2010). Remote Sensing of Vegetation. Oxford University Press, Oxford.

Jiang, Z., Huete, A. R., Chen, J., Chen, Y., Li, J., Yan, G. & Zhang, X. (2006). Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction. *Remote sensing of environment*, 101(3), 366-378.

Ke, Y., Im, J., Lee, J., Gong, H. & Ryu, Y. (2015). Characteristics of Landsat 8 OLI-derived NDVI by comparison with multiple satellite sensors and in-situ observations. *Remote Sensing of Environment*, 164, 298-313.

KMK (2004b). Bildungsstandards im Fach Physik für den Mittleren Schulabschluss. München: Luchterhand, 16.12.2004.

Labudde, P. (2014). Fächerübergreifender naturwissenschaftlicher Unterricht – Mythen, Definitionen, Fakten. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 20(1), 11-19.

Mangold, K., Shaw, J. & Vollmer, M. (2013). The physics of near-infrared photography. *European Journal of Physics* 34 (2013), 51-71.

Nakamura, J. (Hrsg.) (2016). Image sensors and signal processing for digital still cameras. CRC press.

Nijland, W., De Jong, R., De Jong, S. M., Wulder, M. A., Bater, C. W. & Coops, N. C. (2014). Monitoring plant condition and phenology using infrared sensitive consumer grade digital cameras. *Agricultural and Forest Meteorology*, 184, 98-106.

Primicerio, J., Di Gennaro, S. F., Fiorillo, E., Genesio, L., Lugato, E., Matese, A. & Vaccari, F. P. (2012). A flexible unmanned aerial vehicle for precision agriculture. *Precision Agriculture*, 13(4), 517-523.

Rabatel, G., Gorretta, N. & Labbé, S. (2011). Getting NDVI Spectral Bands from a Single Standard RGB Digital Camera: A Methodological Approach, CAEPIA 2011, *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, 7023, 333-342.

Rabatel, G., Gorretta, N. & Labbé, S. (2012, July). Getting simultaneous red and near infrared bands from a single digital camera for plant monitoring applications. In CIGR-Ageng 2012. International Conference on Agricultural Engineering (pp. 6ff.). Received from: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00777950> – abgerufen am 20.07.2017.

Rasmussen, J., Ntakos, G., Nielsen, J., Svendsgaard, J., Poulsen, R. N. & Christensen, S. (2016). Are vegetation indices derived from consumer-grade cameras mounted on UAVs sufficiently reliable for assessing experimental plots? *European Journal of Agronomy*, 74, 75-92.

Reuschenbach, M. (2007). Entwicklung und Realisierung eines Konzepts zur verstärkten Integration

der Fernerkundung, insbesondere von Luft- und Satellitenbildern, in den Geographieunterricht (Dissertation). Universität Zürich.

Rienow, A., Hodam, H. & K. Voß (2015). Die Erde von oben verstehen lernen – Das Lernportal „Fernerkundung in Schulen“. *Geographie aktuell und Schule* 214(37), 29-33.

Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., Deering, D. W. & Harlan, J. C. (1974). Monitoring the vernal advancement of retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation. NASA/GSFC, Type III, Final report, Greenbelt, MD, USA.

Schirrmann, M., Giebel, A., Gleiniger, F., Pflanz, M., Lentschke, J. & Dammer, K. H. (2016). Monitoring Agronomic Parameters of Winter Wheat Crops with Low-Cost UAV Imagery. *Remote Sensing*, 8(9), 706.

Schüttler, T. & Girwidz, R. (2017). Do It Yourself Remote Sensing – ein deutsch-israelisches Schülerprojekt. In: C. Maurer (Hrsg.), Implementation fachdidaktischer Innovation im Spiegel von Forschung und Praxis. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Zürich 2016. (S. 304). Universität Regensburg.

Shaw, J. A., Nugent, P. W., Kaufman, N. A., Pust, N. J., Mikes, D., Knierim, C., ... & Knighton, W. B. (2012). Multispectral imaging systems on tethered balloons for optical remote sensing education and research. *Journal of Applied Remote Sensing*, 6(1), 063613-063613.

Thoms, L. J., Colicchia, G. & Girwidz, R. (2013). Low-cost experiments on infrared phenomena. *Physics Education*, 48(1), 16.

Viehrig, K. (2015). Exploring the effects of GIS use on students' achievement in geography (Dissertation). Pädagogische Hochschule Heidelberg, Fakultät für Natur- und Gesellschaftswissenschaften, Abteilung Geographie.

UBA – Umweltbundesamt (2017). Welchen Beitrag können Satellitenfernerkundung und insbesondere Copernicus-Daten und -Dienste für die Ermittlung ausgewählter Indikatoren des Indikatoren-Sets der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) leisten.

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/welchen-beitrag-können-satellitenfernerkundung> – abgerufen am 20.07.2017

Watzka, B. & Girwidz, R. (2015). Einfluss der Kontextorientierung und des Präsentationsmodus von Aufgaben auf den Wissenserwerb und die Transferleistung physikalischer Inhalte. *ZfDN* 21(1), S. 187-206.

Zhang, L., Sun, X., Wu, T. & Zhang, H. (2015). An analysis of shadow effects on spectral vegetation indexes using a ground-based imaging spectrometer. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12(11), 2188-2192.

Danksagung

Die Autoren danken dem Fernerkundungsteam des DLR_School_Lab Oberpfaffenhofen für die Unterstützung bei der Durchführung der Messkampagne und Derek Rogge vom Deutschen Fernerkundungsdatenzentrum für die Bereitstellung des Feldspektrometers.