

Eye on Water RPI – ein Do It Yourself maker Sensorsystem Projekt zur Messung von Wasserfarben für Citizen Science

Nick Rüssmeier^{1,3}, Jochen Wollschläger², Felix Becker³

¹Jade Hochschule, Fachbereich Ingenieurwissenschaften, Wilhelmshaven, Deutschland

²Institut für Chemie und Biologie des Meeres (ICBM), Universität Oldenburg, Oldenburg, Deutschland

³Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH (DFKI), Marine Perception, Oldenburg, Deutschland

Zusammenfassung

Das Eye on Water RPI - ein Do-It-Yourself-Maker-Projekt zur Wasserfarbmessung für Citizen Science - beschreibt die systematische Entwicklung und Evaluation eines nachbaubaren optischen Sensorsystems als Do It Yourself (DYI) Maker Projekt, mit dem eine automatische Bestimmung der Wasserfarbe nach der Forel-Ule-Farbskala mit einem Raspberry Pi und einer dazugehörigen Kamera ermöglicht wird. Ziel ist es, die Eigenständigkeit wissenschaftlich interessierter und technisch versierter Laien beim Bau eigener Forschungsgeräte und deren Datenerfassung zu fördern. Außerdem soll es für die „Maker-Szene“ als Inspiration für eigene Erweiterungen dienen. Aus diesem Grund ist es entscheidend, dass die verwendete Soft- und Hardware als *Open Source Projekt* zur Verfügung gestellt wird. Dabei sollen die Bilddaten nach wissenschaftlichen Kriterien automatisiert, vergleichbar und qualitativ hochwertig verarbeitet werden, so dass Anwendungsfehler von der Bildaufnahme bis zur Auswertung minimiert werden. Nach der Systementwicklung von Hard- und Software werden Prototypen gefertigt und im Einsatz auf ihre technische Eignung, deren Handhabung als auch auf wissenschaftliche Qualität der Datenerfassung, -verarbeitung und -auswertung getestet.

Keywords: Partizipative Wissenschaft, Wasserqualität, Forel-Ule-Skala, Sensorsystem, EyeOnWater.

Einleitung und Motivation

Die Einbindung der Öffentlichkeit in die Erfassung von Umweltbeobachtungen hat unter dem Begriff „Bürgerwissenschaft“ an Bedeutung gewonnen. Diese Beobachtungen helfen Experten, lokale Prozesse besser zu verstehen, und wecken das Bewusstsein und das Engagement der breiten Öffentlichkeit für die Umwelt. Grundlegend für die Bürgerwissenschaft ist nicht nur eine aktive Beteiligung, sondern auch der wissenschaftliche Wert, der aus den Beobachtungen hervorgeht.

Anhand der Blue Marble (Abbildung 1) wird deutlich das bspw. die Färbung des Wassers von Ozeanen, Küsten- und Binnengewässern regional/global variiert. Licht spielt dabei eine Schlüsselrolle in aquatischen Ökosystemen, sowohl im Meer als auch im Süßwasser. Ursächlich hierfür sind Wechselwirkungen des einfallenden Lichts mit optisch aktiven Komponenten (OACs) [2]. Diese absorbieren und streuen das Licht in Abhängigkeit der verschiedenen Wellenlängen, verleihen so dem Wasser seine charakteristische Farbe und beeinflussen auch die Lichtverfügbarkeit unter Wasser. Drei wesentliche OACs, welche

ebenfalls wichtige Indikatoren für die Wasserqualität darstellen, tragen hierzu bei: 1. gelöstes organisches Material (chromophoric dissolved organic matter; CDOM), 2. nicht gelöste anorganische Materialien wie bspw. Schwebstoffe und Sedimentfracht (Nicht-Algen-Partikel) und 3. Phytoplankton mit seinen verschiedenen Photosynthesepigmenten (vornehmlich Chlorophyll-a; Chl-a).



Abb. 1: Blue Marble westliche Hemisphäre [1], Farbvariationen von Ozeanen, Küsten- und Binnengewässer.

Durch deren jeweiligen Zusammensetzung ergeben sich somit vielfache dynamische zeitlich/saisonale Variationen, bspw. durch Algenblüten in der Folge des Eintrags von nährstoffreichen Wassermassen aus Flüssen, bei Regen oder nach einem Sturm. Veränderungen in den Konzentrationen dieser Stoffe können somit in Verbindung mit bedeutsamen Fragestellungen von gesellschaftlichem Interesse gestellt werden, beispielsweise zum Klimawandel oder zur Eutrophierung.

Eine Herausforderung in der Meeresforschung ist es, umweltfreundlich und ohne Eingriff in die Hydrosphäre, möglichst kontextbasierte und geolokalisierte Informationen über einen repräsentativen Zeitraum zu sammeln und diese qualitätsorientiert aufbereitet, langfristig und sicher über internationalen Datenbanken zur Verfügung zu stellen. Zur globalen Fernerkundung kommen daher Satelliten zum Einsatz, deren Messdaten (Satellite Data Processing Levels, [3] durch lokale Messungen (remote sensing reflectance, Rrs) mittels Radiometern gegenkalibriert werden.

Stand der Wissenschaft und Technik

Die Farbe des Wassers wird bereits seit 150 Jahren durch den Menschen dokumentiert, also lange bevor Erdbeobachtungssatelliten zur Verfügung standen. Hierzu wurden und werden unterschiedliche Bezugssysteme (Farbskalen) eingesetzt. Eine sowohl in der Limnologie als auch Meeresforschung gebräuchliche Skala ist die nach Forel-Ule [4]. Dazu wird eine Wasseroberfläche vom Betrachter subjektiv mit einer Forel-Ule-Skala [5] (Abbildung 2), vor dem Hintergrund einer weißen Fläche (Secchi-Scheibe) [6], verglichen und die vorliegende Wasserfarbe zu einem der 21 repräsentativen Farbwerte, dem Forel-Ule-Index (FUI), zugeordnet.

Die Vorteile dieser historischen Methode liegen in der einfachen Handhabung, der Kosteneffizienz und der langen Anwendungsdauer. Zur Fortführung von Zeitreihen erfolgt auch heute noch die Beobachtung der Wasserfarbe nach der gleichen Beobachtungsmethode. Somit stehen heute wertvolle Zeitreihen mit mehreren Millionen auswertbaren Messungen zur Verfügung, welche, in einen wissenschaftlichen Kontext gestellt, historische oder saisonale Veränderungen der Umwelt oder ökologisch relevante Umwelteinflüsse aufdecken können [7] und somit gegebenenfalls zur Entscheidungsgrundlage von präventiven oder eingreifenden Maßnahmen geeignet sind.

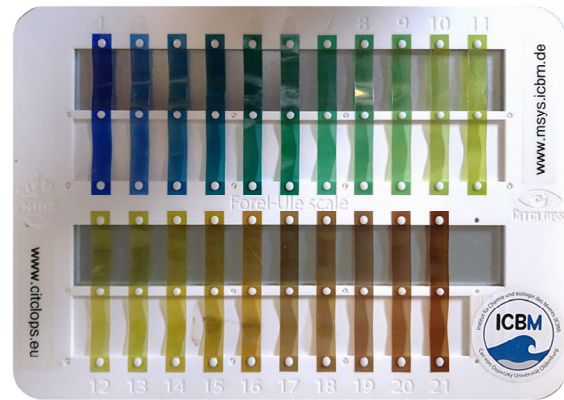


Abb. 2: Moderne FU-Kunststoff-Skala mit 21 Indexwerte zur Farbbestimmung natürlicher Gewässer.

Insgesamt liegen zwar große Mengen von Farbmessung vor, längere Zeitreihen in einzelnen Gebieten sind allerdings immer noch vergleichsweise selten. Ein Ansatz, um mehr lokale Daten zu sammeln, ist die Beteiligung von Bürgern im Rahmen von Citizen Science. Ein Beispiel und motivierender Impuls für die Bürgerwissenschaft bietet der internationale Ocean sampling day (OSD) [8]. Das Projekt wurde zur Sommersonnenwende am 21. Juni 2014 gestartet und ist eine globale Forschungskampagne, bei der Bürger und Meeresbiologen aus der ganzen Welt Proben aus den Weltmeeren nehmen, um kontextbezogene Daten zu sammeln.

Der Zeitaufwand für die manuelle Erfassung nach Forel-Ule sowie die Notwendigkeit einer entsprechend angefertigten Forel-Ule-Skala und dem Einsatz einer Secchi-Scheibe stellen jedoch Hindernisse für die Anwendung durch die Bürgerinnen und Bürger dar. Da zudem der subjektive Farbeindruck des Betrachters durch die vorliegenden Umgebungsbedingungen wie z.B. Bewölkung, direkte Sonneneinstrahlung oder auch Wind und damit eine unruhige Wasseroberfläche variieren kann, ist für die manuelle Bestimmung der Wasserfarbe nach Forel-Ule für die Bürgerwissenschaft eine gewisse Übung nötig um qualitativ auswertbare und vergleichbare Daten zu erhalten. Aus diesem Anlass wurden Apps für Smartphones entwickelt, die diesen Farbvergleich elektronisch nachahmen und den Betrachter durch die Vereinfachung der Messung unterstützen ohne Notwendigkeit einer physischen Forel-Ule-Skala. Diese Innovation ermöglicht den Übergang von der manuellen Erfassung hin zur teilautomatisierten Smartphone-basierten Bewertung der Wasserfarbe.

In den letzten Jahren gab es auf dem OSD aufbauende Projekte, in dem Messverfahren zur Gewässerüberwachung entwickelt wurden

und in einem Citizens Science-Ansatz für optische Küsten- und Ozeanüberwachung zum Einsatz kamen [9]. In diesem Rahmen wurde zum Beispiel die EyeOnWater Smartphone-App vom „Royal Netherlands Institut for Sea Research“ (NIOZ) entwickelt um der Bürgerwissenschaft einen einfachen Zugang zur Bestimmung nach Forel-Ule zu ermöglichen.

Mit der „EyeOnWater“-App werden Wasseroberflächen mit einer Smartphone Kamera aufgenommen und mit einer Farbskala auf dem Display verglichen, die den FUI des Wassers repräsentieren. Das angewendete Auswertverfahren der RGB-Bilder basiert auf einem sog. WACODI-Code (WATER COLOR from Digital Images, [10] Bei der Methode werden Bilder aus dem sRGB-Farbraum zunächst in den CIE XYZ- Farbraumkoordinaten (CIE 1931, Commission Internationale de l’Eclairage) konvertiert und einer Gamma-Erweiterung sowie einer Beleuchtungskorrektur unterzogen, welche spiegelnde Reflexion an der Luft-Wasser-Grenzfläche berücksichtigt. Die so erhaltenen XYZ-Werte jedes einzelnen Pixels des Bildes werden in x und y Farbkoordinaten und anschließend in einen Farbtonwinkel (α_w) der Normfarbtabelle umgewandelt. Auf Grundlage der Verteilungen von α_w in Teilbereichen des Bildes wird eine Annäherung an die Eigenfarbe des Wassers erreicht, die Zuordnung zu des spezifischen der 21 möglichen FU-Index ist in einer Korrelationstabelle zusammengeführt. Dem Nutzer wird daraufhin ein entsprechender Index der FU Skala zur Auswahl vorgeschlagen. Zusätzlich kann angegeben werden, ob es zum Zeitpunkt der Messung geregnet hat und ob der Gewässergrund im Bild sichtbar war. Beides dient der nachträglichen Qualitätskontrolle der Messung. Abschließend gibt die App eine textliche Erklärung aus, welche Skalenstufe gewählt wurde und was die unterschiedlichen Skalenstufen für den Wasserzustand bedeuten können. Ein Vorteil dieser App ist, dass die Daten frei zugänglich und transparent im Internet auf der eigens entwickelten Webseitenapplikation (www.eyeonwater.org, Abbildung 3) hochgeladen werden können und im Anschluss für alle Nutzer auf einer übersichtlichen Karte zur Anzeige oder weiteren Nutzung frei zur Verfügung stehen. Die Regression zwischen den aus radiometrischen Daten und den aus digitalen Bildern extrahierten α_w , wurden mit einem Bestimmtheitsgrad von $r^2=0.93$ evaluiert. Problematisch ist, dass trotz der guten Anleitung mit der App teilweise keine verwertbaren Bilder erzeugt werden können.

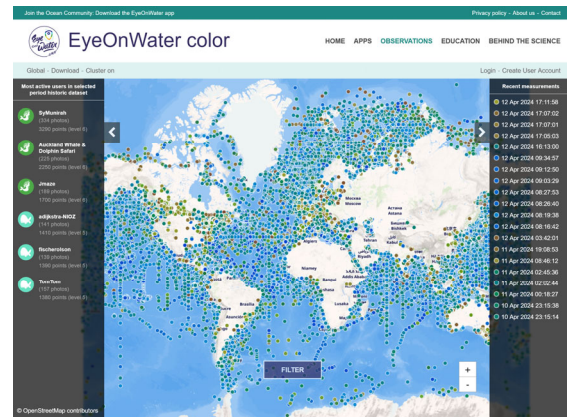


Abb. 3: Webseitenapplikation (eyeonwater) für die Bürgerwissenschaft.

In Anwendungsstudien wurden einige Probleme identifiziert, die im Rahmen weiterer Arbeiten behandelt werden sollten. Hauptsächlich sind variable Beleuchtungsbedingungen sowie der Weißabgleich, eine Rauigkeit der Wasseroberfläche sowie die manuelle Auswahl von Bildausschnitten durch die Anwender mögliche Quellen für Ungenauigkeiten und Abweichungen.

Darüber hinaus kann Sonnenreflektion als vorübergehende Anomalie auftreten, wenn Sonnenlicht von der Meeresoberfläche direkt in den nach unten gerichteten optischen Sensor reflektiert. Faktoren wie Sonnenstand, Blickwinkel des optischen Sensors, Brechungsindex des Wassers, Wolkenbedeckung sowie die Windrichtung und -geschwindigkeit beeinflussen den Effekt des Sonnenglitzers [11]. Bei einem automatisierten Messeinsatz ist somit nicht auszuschließen, dass Messergebnisse durch die Umgebungseinflüsse verfälscht werden, da der Anwender keine präventiven Maßnahmen bei der Bildaufnahme ergreifen wird.

Eine weitere Möglichkeit mit einem weitergehenden Ansatz bietet die „HydroColor“-App, hierbei wird eine Graukarte mit 18 % Reflexionsgrad als Referenzfläche für die Normalisierung von Farbwerten und Korrektur der vorherrschenden Lichtverhältnisse verwendet [12]. Mittels der „HydroColor“-App werden jeweils drei separate Bilder der Umgebung aufgenommen und in Beziehung gesetzt (Himmel, Graukarte und Wasserkörper), darüber hinaus Metadaten von GPS und Gyroskop der Smartphonesensoren. Zunächst werden die aufgenommenen Farbbilder in drei Wellenlängenbereichen (rot, grün und blau) unterteilt, anschließend deren relativer Radianzwert in Bezug auf die Graukarte normalisiert. In Bezug auf das Himmelsbild wird ein annähernd

belichtungsunabhängiges Ergebnis der Remote Sensing Reflectance berechnet, dem gleichen Endprodukt, welches auch aus den Messdaten von Satelliten zur Wasserbeobachtung errechnet wird. Diese Methode ermöglicht eine objektive Auswertung durch Sensoren ohne weitere manuelle Eingaben durch den Benutzer. Die Vergleichbarkeit der Daten wird dadurch erhöht und ein Teil des menschlichen Fehlereinflusses umgangen. Alle Daten werden im Smartphone verarbeitet und gespeichert. Die Daten bestehen aus einer Textdatei, die sowohl Primärdaten und abgeleitete Produkte (Rrs, Lichtwerte, RGB Reflektion, Trübung, Chlorophyllkonzentration) [13] sowie Metadaten (Breitengrad, Längengrad, Datum, Uhrzeit, Sonnenstand, Ausrichtung des Telefons) beinhaltet. Für die HydroColor-Anwendung wird angegeben Rrs im roten, grünen und blauen Teil des sichtbaren Spektrums mit einer Genauigkeit von 26% eines präzisen Radiometers zu messen. Das Endprodukt kann über die App oder über einen Computer abgerufen werden.

Vorgeschlagener Lösungsansatz – ein automatisches optisches Sensor-System

Aufgrund dieses Bedarfs an hochauflösenden Langzeitmessungen wurde, aufbauend auf der zuvor erwähnten Datenerfassung durch Bürger mit Smartphones über die EyeOnWater Webseite, ein automatisches optisches Sensorsystem auf Basis eines Raspberry Pi Computers und Kameramodulen entwickelt. Dies ermöglicht sowohl eine stationäre Langzeitanwendung, z. B. auf einem Steg am Wasser, sowie auch mobile automatische Anwendungen. Mit dem System werden Bildzeitreihen und Metadaten automatisch über einen Softwarecode zu der Forel-Ule Skala nach wissenschaftlichen Standards auf Basis des WACODI-Codes ausgewertet. Es wird eine Genauigkeit von ± 2 FUJ angestrebt, wobei Korrekturverfahren von variablen Beleuchtungsbedingungen sowie der Weißabgleich durch eine Erweiterung mittels einer Graukarte mit 18 % Reflexionsgrad als Referenzfläche für den Farbwert [128 128 128] im RGB-Farbraum vorgesehen werden. Nach der Integration zu einem „Eye on Water Raspberry Pi“ (EOW-RPI) Gesamtsystem werden Prototypen gefertigt und im Feldeinsatz deren Eignung als auch wissenschaftliche Qualität bzgl. der Datenerhebung verifiziert. Anschließend werden die Daten über die bereits etablierte EyeOnWater-Webseite zur Verfügung gestellt und können somit für die Gemeinschaft einen Beitrag leisten.

Das Hauptaugenmerk in diesem Beitrag liegt dabei auf der systematischen interdisziplinären Produktentwicklung, Dokumentation für den Nachbau sowie Verifizierung und Validierung entlang der VDI/VDE 2206 Richtlinie "Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme" von Hardware und Software, hin zu einem optischen Sensorsystem für die DIY – Bürgerwissenschaft.

Design /Entwicklung und Gesamtintegration zum “Eye on Water RPI”, geeignet zum Nachbau für die Bürgerwissenschaft

Bei dem Bedien- und Anwendungskonzept des EOW-RPI wurden folgende Phasen unterschieden: Die Vorbereitung zum Aufbau des Systems, dessen regelmäßige Nutzung und die abschließende Veröffentlichung der Daten auf der EyeOnWater-Website. Damit Personen auch mit wenig technischem Grundwissen und einfacher Ausstattung die Umsetzung gelingt, berücksichtigt das Systemkonzept für die Bürgerwissenschaft und Maker-Szene kostengünstigen Materialien für den Gestaltungsprozess, eine einfache Handhabung für den Feldeinsatz bei einem modularen Aufbau der Systemarchitektur. Die modulare Systemarchitektur mit deren Schnittstellen, Energiemodule (EM), Energiemanagement (WPI), Kameramodul (KM), Lokalisierungsmodul (GPS) sowie Speichermodul im wetterfesten Gehäuse für den Außenbereich des EOW und den externen Schnittstellen zur Systemsoftware und zur EOW-Datenbank ist in Abbildung 4 dargestellt.

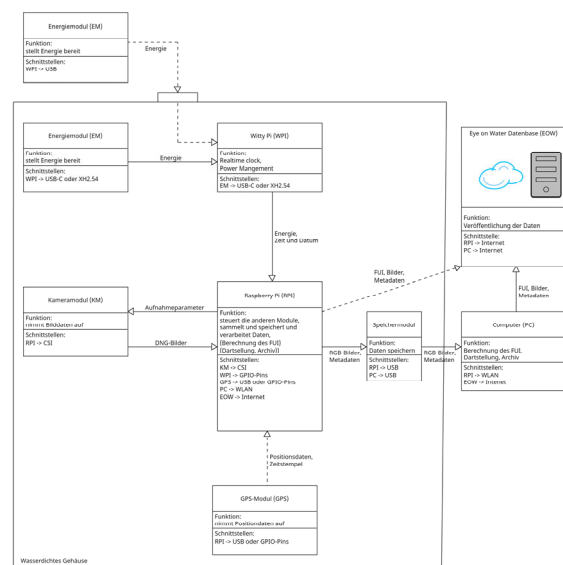


Abb. 4: Systemarchitektur des EOW-RPI mit Hardwaremodulen und Schnittstellen zur Systemsoftware und Datenbank.

Bedien- und Anwendungskonzept, Materialien sowie technische Dokumentation

Die Vorbereitung umfasst alle Schritte von der Beschaffung aller notwendigen Teile über die Montage der mechanischen Komponenten bis hin zur Installation und Konfiguration der Software, damit das EOW-RPI Sensorsystem für eine Messkampagne einsatzbereit ist. Da das System international Anwendung finden soll, müssen Materialien überall erhältlich sein, für das entwickelte Gehäusemodell des EOW-RPI (Abbildung 5, rechts) wird eine 3D STEP Datei bereitgestellt. Hierbei können die Anwender selbst entscheiden, ob ein eigenes Gehäuse aus Altmaterialien zum Einsatz kommen soll oder sie das entsprechende Gehäuse mittels Rapid Prototyping im 3D-Druckverfahren herstellen. Die Gesamtkosten der benötigten Materialien für das EOW Sensorsystem betragen ca. 250 Euro. Für die Hardware werden mindestens ein Raspberry Pi4 (Modell B 2022, 4GB, Raspberry Pi Fd.), eine Raspberry Pi HQ Kamera (12,3-Megapixel-Sensor Typ Sony IMX477) inkl. C-Mount 16mm Teleobjektiv für HQ Kamera (PT3611614M10MP, CGL Electronic), USB-Datenträger, eine Energieversorgung sowie Gehäuse mit Referenz-Weißabgleich Graukarte 18% (CL-CAM1113, ChromLives) benötigt.

Abbildung 5 (links) veranschaulicht die Komponenten zur Erstellung des EOW-RPI Sensorsystems. Der Aufbau in der Basisversion erfolgt modular und ist darüber hinaus mittels GPS-Sensor (bspw. TTL GPS Modul mit u-blox NEO-6M Chipsatz) oder Initiallagesensor erweiterbar gehalten. Durch eine Erweiterung (Witty Pi, UUGear, Dun Cat B.V.) kann darüber hinaus eine weitere flexible Schnittstelle zur Energieversorgung und Energieverwaltung sowie Echtzeituhr vorgesehen werden, wobei jede der Komponente wieder demontiert werden kann um diese später für andere Projekte erneut zu verwenden. Die Software wird für die Nutzer vorkonfiguriert als fertiges SD-Karten-Image bereitgestellt

Im Feldeinsatz speichert das EOW-RPI Sensorsystem verlustfreie DNG-Bilddaten (Digital-Negative-Format) sowie Standard-EXIF-Metadaten (Exchangeable Image File Format) auf Basis eines Zeitstempels, automatisch in vordefinierten Zeitintervallen auf einem wechselbaren externen USB-Datenträger. Für eine spätere Korrekturberechnung des Weißabgleichs ist im aufgenommenen Bildbereich jeweils ein sichtbarer Anteil der Graukarte enthalten.

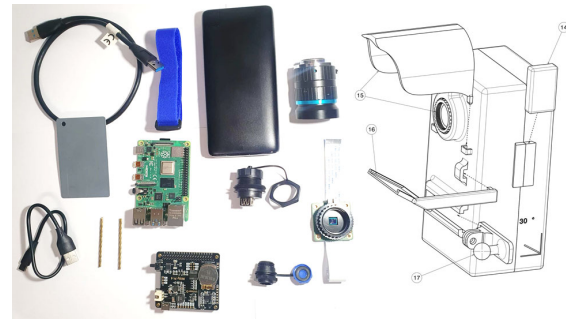


Abb. 5: 3D Gehäusemodell des EOW-RPI (rechts), Komponenten zur Erstellung des EOW-RPI Sensorsystems (links).

Die Graukarte wird statisch über eine integrierte Halterung am EOW-Sensorsystem positioniert. Die Bildaufnahmen erfolgen daher ohne automatischen Weißabgleich. Referenzdaten zur Standortposition werden entweder automatisch über den optionalen GPS-Empfänger erfasst, alternativ kann die zugehörige Geolokation über die Benutzeroberfläche der Systemsoftware während der Nachbearbeitung für alle Daten manuell eingetragen werden. Im regulären Betrieb kann das EOW-RPI Sensorsystem mittels ssh-Client im lokalen Netzwerk überwacht werden. Für einen längerfristigen automatischen Feldeinsatz ist ausreichend Speicherkapazität zu berücksichtigen. Im verlustfreien DNG Format erfordert ein Bild mit maximaler Auflösung von 4056x3040 Pixel 17,6 MB Speicherplatz, was im Einsatz bei durchschnittlich 4 Messungen pro Tag mit je 2 Bildern ca. 1 GB Daten pro Woche entspricht. Bei der Positionierung am Messstandort wird die Kamera in einem Winkel von 30 Grad zur Wasseroberfläche und in Richtung Norden ausgerichtet, um direkte Sonnenreflexionen von der Wasseroberfläche zu vermindern. Zur korrekten Neigungsausrichtung ist hierfür eine Markierung am Gehäuse des Sensorsystems angebracht, so dass im Feld keine weiteren Hilfsmittel benötigt werden. Der Sichtbereich sollte nur die Graukarte sowie die zu messende Wasseroberfläche, jedoch nicht den Boden des Gewässers und keine weiteren fremden Objekte wie bspw. Pflanzen, einschließen.

Datenverarbeitung Softwarecodes und Benutzeroberfläche, API Schnittstelle zur EyeOnWater-Datenbank

Für die abschließende Veröffentlichung der FU-Werte einer Messreihe auf der EyeOnWater-Website werden die aufgenommenen DNG-Bilddaten zunächst vom USB-Datenträger auf einen PC übertragen. Im Anschluss erfolgt über die grafische

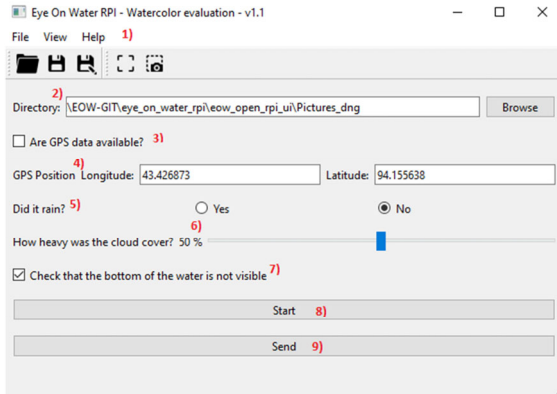


Abb. 6: Grafische Benutzeroberfläche des EOW-RPI Sensorsystems.

Benutzeroberfläche (Abbildung 6) der Systemsoftware eine automatische Auswertung, wobei zusätzlichen Informationen wie bspw. die Standortlokation durch die Anwender ergänzt werden können. Als Programmiersprache wurde Python verwendet, dies ist bereits im Raspberry Pi OS vorinstalliert und für die Entwicklung von Internet of Things (IoT) Projekten weit verbreitet. Mit einem Raspberry Pi benötigt der Prozess von Bildaufnahme bis zur finalen Auswertung circa drei Minuten.

Die Datenverarbeitung erfolgt über fünf Ebenen (Abbildung 7) von den Rohbilddaten bis zu einem standardisierten und qualitätsgesicherten CSV-Datensatz mit FU-Wert und Metadaten.

Ausgehend von den Rohdatenformat in Ebene 1, erfolgt in Ebene 2 eine Vorverarbeitung zur Konvertierung der Rohdaten in RGB-Bilddaten über Demosaicing. Vorhergehend erfolgt eine Gamma-Offsetkorrektur auf Basis der EXIF-Metadaten sowie Normalisierung des Weißabgleichs aller RGB-Farbkanäle, welche sich aus dem Mittelwert der Farbverteilung der Graukarte berechnet. Bei einer erfolgreichen Korrektur weisen somit alle drei Farbkanäle die gleiche Intensität unter neutraler homogenen Beleuchtung auf.

In der Ebene 3 wird ein standardisierter Datensatz aus Bild, sowie Metadaten wie Zeitstempel und Positionsdaten zusammengeführt, sowie anschließend das Bild automatisch qualitätsgesichert auf Muster von Sonnenglitzern oder Schaumkronen analysiert. Die Anomalieanalyse erfolgt nach der evaluierten Mustererkennung von Garaba et. al. und basiert auf einer Schwellenwertverteilung Graustufenhistogramm. Im Falle einer erkannten Abweichung wird einem Bild eine Markierung im Metadatensatz (flag) zugeordnet und aus

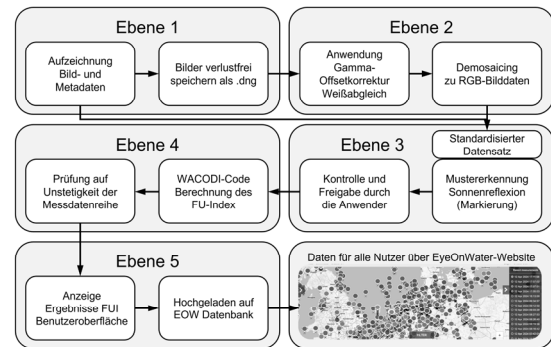


Abb. 7: Datenverarbeitungsebenen von den Rohbilddaten bis zu einem Datensatz mit FU-Wert und Metadaten zur Übertragung in die EOW-Datenbank.

den folgenden Analyseschritten ausgeschlossen. Dieser Schritt wird durch den Anwender nach manueller Kontrolle über die EOW-Benutzeroberfläche bestätigt.

Die Berechnung des FU-Index erfolgt in der Ebene 4, basierend auf dem WACODI-Algorithmus der EyeOnWater App, wie zuvor im Kapitel Stand der Wissenschaft und Technik beschrieben. In dem EOW-Programmablauf wird u. a. der Mittelwert aller im Bildbereich vorliegenden Farbtonwinkel (α_w) gebildet und abschließend über die bekannte α_w Korrelationstabelle der FU errechnet. Beispielsweise entspricht die Spektralwinkelfunktion von 225° auf Basis des CIE-Normfarbsystem ein FU von 2 für die Eigenfarbe eines Gewässers. Bei sprunghaften Veränderungen des FU werden Ausreißer in einer zusammenhängenden Messdatenreihe überprüft und im Datensatz markiert.

Mit der abschließenden 5. Datenverarbeitungsebene wird der standardisierte Datensatz mit dem errechneten FU ergänzt und zur Übertragung in die EOW-Datenbank vorbereitet. Die Ergebnisse können über die entwickelte grafische Benutzeroberfläche des EOW-Systems angesehen, sowie nach Registrierung eines Autorisierungstokens auf der EOW Datenbank hochgeladen werden. Die Definition der Programmierschnittstelle nach dem OpenAPI 3-Standard (<https://www.eyeonwater.org/iot-api/>) wurde im Projekt durch den Betreiber der Webseite von [eyeonwater.com](https://www.eyeonwater.com) (MARIS B.V.; Niederlande) unterstützt. Über HTTP-Standard multipart/form-data, können dabei mehrteilige Anfragen ohne unnötigen Datenaufwand gesendet werden, da ein oder mehrere Datensätze in einem einzigen Textkörper zusammengefasst sind. Schlussendlich stehen die Daten allen Nutzern und Forschenden über die EyeOnWater-Webseite zur Verfügung.

Evaluation des Eye on Water RPI Systems

Im Verlauf der Entwicklung wurden funktionale technische Eigenschaften zum modularen Systemaufbau, Softwarefunktionalitäten sowie Services zum Heraufladen von Daten auf die internationale Datenbank erprobt. Nach der Systemintegration erfolgte eine Handhabungsstudie bei der das EOW-RPI Sensorsystem im Feldeinsatz angewendet wurde (Abbildung 8, links), die gewonnene Datenbasis wurde aufgrund des kurzen Einsatzzeitraums nicht zur Evaluation des Messverfahrens herangezogen. Hierzu wurde eine systematische Betrachtung über Vergleichsmessungen bei variierender Umgebungsbeleuchtung anhand FU-Referenzfarbwerttafeln des Forel Ule Colour Book durchgeführt [14]. Bei dem Experiment wurde eine Ringleuchte mit einstellbarer Farbtemperatur als Beleuchtungsquelle verwendet. Im Zentrum der Lichtquelle befindet sich die Kamera des Raspberry Pi EOW sowie dessen Halterung mit der Referenzgraukarte, welche im unteren Teil des Bildausschnitts abgebildet wird (Abbildung 8, rechts). Für jede der 21 FU-Referenzfarbwerte wurden Bildaufnahmen unter unterschiedlichen Farbtemperaturen bei 3200 K, 3900 K, 4600 K sowie 5300 Kelvin aufgenommen und die FU der 84 Bildvariationen, bei Anwendung der Farbkorrektur über die Referenzwerte der Graukarte, ausgewertet.

Abbildung 9 zeigt die Ergebnisse des Laborversuchs, für jede der 4 eingestellten Umgebungslichttemperaturen. Auf der Ordinate sind die gemessenen FUIs gegen die Referenz FUI auf der Abszisse aufgetragen, die Winkelhalbierende gibt den Referenzwert wieder.



Abb. 8: Laboraufbau zur Ermittlung des Weißlichtabgleichs in Abhängigkeit der Umgebungslichttemperatur (rechts), Handhabungsstudie im Feldeinsatz des EOW-RPI Sensorsystems (links).

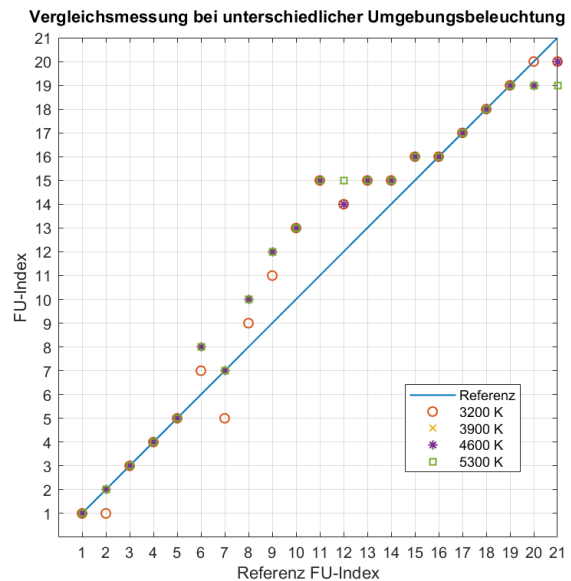


Abb. 9: Ergebnisse des gemessenen Forel-Ule-Index im Laborversuch bei unterschiedlichen Umgebungslichttemperaturen. Auf der Ordinate sind die gemessenen FUIs gegen die Referenz FUI auf der Abszisse aufgetragen, die Winkelhalbierende gibt den Referenzwert wieder.

Die Messdaten von 39 ausgewerteten Bildern korrelieren mit dem zugeordneten FU-Referenzwert. Weitere 18 weichen um einen FU sowie 16 Werte um zwei FU, des tolerierbaren Fehlerintervalls von ± 2 FU ab. Bei den Messungen der FUIs 9, 10 und 11 weisen insgesamt 11 Messwerte eine größere Abweichung auf. Im Vergleich von identischen Farbwertfolien ergeben sich geringe Unterschiede bei den vier unterschiedlichen Lichttemperaturen. Ausnahmen bilden hierbei u. a. FU2 - 3200 K, FU6 - 3200 K und FU21 - 5300 K, wo identische FUI bei variierenden Farbtemperaturen abweichen. Mit dem Laborversuch wurde deutlich, dass der Einfluss der Umgebungsbeleuchtung durch die Verwendung einer Graukarte und der Anpassung eines individuell für jedes Bild bestimmten Weißabgleichs reduziert werden kann. Allerdings gibt es systematische Abweichungen vom bekannten Zielwert. Die Identifikation der FUI 9 bis 12 ist mit 3 FUI außerhalb des tolerierten Fehlerintervalls unzureichend. Die Kostenreduktion des Gesamtsystems ist mit einer Einschränkung der Auswahl der verwendbaren Bildsensoren verbunden, was u. a. zu einer geringeren Qualität der Bilddaten führen kann. Bis auf wenige Ausnahmen kann der ermittelte FUI für einen jeweiligen Farbwert bei unterschiedlichen Beleuchtungsbedingungen als homogen betrachtet werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Ausgehend des Handhabungskonzeptes für Aufbau und Betrieb eines neuen optischen Sensorsystems für die Bürgerwissenschaft zur Erfassung von Gewässerfarben nach Forel-Ule, wurde das Systemkonzept des Eye on Water RPI systematisch entwickelt und prototypisch umgesetzt. Mit dem Projekt konnte eine umfangreiche Dokumentation zum Nachbau des Eye on Water RPi erstellt werden, die auf Anfrage zur Verfügung gestellt wird. In der Diskussion der Ergebnisse wurde deutlich, dass einige gemessenen FUI systematisch vom Zielwert abweichen. Zur Kompensation von systematischen Abweichungen sollten daher Anpassungen von Parametern des WACODI-Codes weiter betrachtet werden, die zahlreichen Bilddatensätze der EOW-Datenbank können hierfür eine Trainings-Datengrundlage bilden. Für den stationären Langzeiteinsatz oder für mobile Anwendungen sind fortführende anwendungsbezogene Feldstudien ergänzend vorzusehen. In dem Zuge kann das EOW-Sensorsystem ebenfalls auf das aktuelle Raspberry Pi Betriebssystem „Bookworm“ migriert werden. Darüber hinaus sind optionale Erweiterungen mittels Weitwinkel-Optik denkbar. Der größere Sichtbereich würde das Sensorsystem im Rahmen neuer Fernerkundungen oder strukturellem Monitoring ergänzen. Die Daten, die mit dem Raspberry Pi von Eye On Water gesammelt werden, können dazu beitragen, die Forschungsbasis für die Limnologie und Ozeanologie zu bereichern. Die vielfache Verwendung von Forel-Ule-basierten Messgeräten und die Dokumentation der Daten helfen, die richtigen Schwerpunkte für eine detailliertere Untersuchung der Hydrosphäre und der Ökosysteme zu setzen.

Beitrag der Autoren und Danksagungen

NR war für Hauptkonzept und Architektur des Systems verantwortlich und entwarf und schrieb die Arbeit, zu der die weiteren Autoren beitrugen. Für das statistische Modell sowie Referenzmessumgebung trug JW zu. FB Datenmodellentwicklung und Integration sowie Verifizierung. Dank für das Engagement des Entwicklungsteams der Webseite von eyeonwater.com (MARIS B.V.; Niederlande) für die Bereitstellung der EyeOnWater Internet of Things API. Das Projekt wurde durch den Forschungsfond der Jade Hochschule unterstützt.

Literaturnachweis

- [1] NASA/Goddard Space Flight Center/Reto Stöckli (Instrument: Terra – MODIS, RELEASE

- DATE: OCTOBER 9, 2007), 2007. Online verfügbar unter <https://earthobservatory.nasa.gov/images/8108/twin-blue-marbles>, zuletzt geprüft am 13.04.2024.
- [2] Kirk, John T. O., *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems*. Third edition, (2011); doi: 10.1017/CBO9781139168212
- [3] NASA Ocean Biology Processing Group. (2019). Ancillary Data Sources. Online verfügbar unter <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/docs/ancillary/>, zuletzt geprüft am 13.04.2024.
- [4] S. Novoa, M. R. Wernand, H. J. van der Woerd, „*The Forel-Ule scale revisited spectrally: preparation protocol, transmission measurements and chromaticity.*“, JEOS:RP 8. (2013); doi: 10.2971/jeos.2013.13057
- [5] S. Novoa, M. R. Wernand und H. J. van der Woerd, „*The modern Forel-Ule scale: a 'do-it-yourself' colour comparator for water monitoring.*“, JEOS:RP 9. (2014); doi: 10.2971/jeos.2014.14025
- [6] J. Pitarch, „*A Review of Secchi's Contribution to Marine Optics and the Foundation of Secchi Disk Science.*“ *Oceanog* 33 (3). (2020); doi: 10.5670/oceanog.2020.301
- [7] M. R. Wernand, H. J. van der Woerd und W. W. C. Gieskes, „*Trends in Ocean Colour and Chlorophyll Concentration from 1889 to 2000, Worldwide.*“, *PloS one* 8 (6): e63766 (2013); doi: 10.1371/journal.pone.0063766
- [8] A. Kopf, M. Bica, R. Kottmann, J. Schnetzer, I. Kostadinov, K. Lehmann, A. Fernandez-Guerra et al., „*The Ocean Sampling Day Consortium.*“ *GigaScience* 4:27. (2015); doi: 10.1186/s13742-015-0066-5
- [9] L. Ceccaroni, J. Piera, M. R. Wernand, O. Zielinski, J. A. Busch, H. J. van der Woerd, R. Bardaji et al., „*Citclops: A Next-Generation Sensor System for the Monitoring of Natural Waters and a Citizens' Observatory for the Assessment of Ecosystems' Status.*“ *PloS one* 15 (3): e0230084 (2020); doi: 10.1371/journal.pone.0230084
- [10] S. Novoa, M. R. Wernand und H. J. van der Woerd, „*WACODI: A generic algorithm to derive the intrinsic color of natural waters from digital images.*“ *Limnology & Ocean Methods* 13 (12): 697–711 (2015); doi:10.1002/lom3.10059
- [11] S. P. Garaba, J. Schulz, M. R. Wernand, O. Zielinski, „*Sunglint Detection for Unmanned and Automated Platforms.*“ *Sensors* 12 (9): 12545–61 (2012); doi:10.3390/s120912545
- [12] T. Leeuw, E. Boss, „*The HydroColor App: Above Water Measurements of Remote Sensing Reflectance and Turbidity Using a Smartphone Camera.*“ *Sensors* 18 (1) (2018); doi: 10.3390/s18010256
- [13] L. Goddijn-Murphy, D. Dailloux, M. White, D. Bowers, „*Fundamentals of in Situ Digital Camera Methodology for Water Quality Monitoring of Coast and Ocean.*“ *Sensors* 9 (7): 5825–43 (2009); doi: 10.3390/s90705825
- [14] I. Kopelman unter Mitarbeit von M. Wernand. *Indexing Water*. Roma publication 337 (2018) ISBN-13: 9789492811332