

# Entwicklung einer autonomen Messstation für Umweltparameter

*Max Lehmann, Otto Dreier, Pál Árki und Yvonne Joseph*

*Institut für Elektronik- und Sensormaterialien, TU Bergakademie Freiberg, Deutschland*

*Kontakt: Max.Lehmann@student.tu-freiberg.de*

## Einleitung

In einem vielfältigen Spektrum von Umwelthanwendungen ist es nötig auf eine genaue Messung von Werten, an verschiedenen Positionen, zurückgreifen zu können. Beispiele dafür sind die Erforschung von Gewässern, die Analyse von Böden sowie die Erfassung von Wetterdaten. Um Veränderungen von Daten an einem Ort über einen längeren Zeitraum, von Wochen bis Monaten, erfassen zu können, ist es notwendig eine stationäre Messstation aufzubauen. Diese Messstationen erfassen Daten und speichern diese. Dabei ist es jedoch erforderlich die Daten manuell zu sammeln, damit diese verarbeitet werden können. Diese Art des Vorgehens kann unpraktisch sein, wenn einerseits die Mess-Orte nur schwer zugänglich sind oder andererseits viele dieser Stationen existieren. Zudem können die Stationen beschädigt werden, was ein Auslesen der Daten unmöglich macht. Es wäre somit wünschenswert eine Messstation sowohl autonom durch erneuerbare Energien zu betreiben als auch die Daten verschiedener Sensoren kabellos an eine Basisstation zu übertragen. Zudem sollte die Messstation erschwinglich sein, damit an vielen Orten gleichzeitig gemessen werden kann und somit die zwei- bzw. dreidimensionale Ausdehnung von Sensorparametern ermittelt werden kann [1].

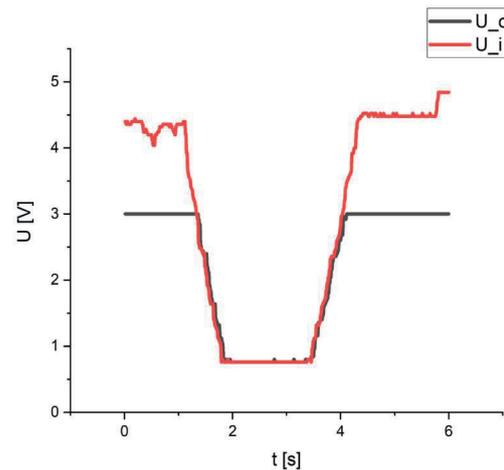
## Konzept der Messstation

### Energiemanagement

Ein leicht zu unterschätzender Punkt ist die notwendige Optimierung und Evaluierung aller Bauteile um einen möglichst geringen Stromverbrauch zu erreichen, sodass ein hinreichend kleines Fotovoltaik Element für den Betrieb der Messstation ausreicht. Zudem wird ein Akku benötigt, damit nachts und bei schlechtem Wetter gemessen werden kann. Dieser muss zudem ausreichend groß dimensioniert sein. Zusätzlich muss im Winter auf den Einfluss von negativen Temperaturen geachtet werden, da diese die Performance insbesondere bei Verwendung von Li-Ion Akkus negativ beeinflusst [2-4].

Der Mikrocontroller sowie einige Sensoren benötigen eine Spannung von genau 3,3 V um fehlerfrei zu arbeiten, ein Lithiumionen Akku besitzt jedoch einen Spannungsbereich von minimal 2,75 V [3] oder 3 V [4], abhängig von der Akkuchemie bis maximal 4,2 V. Um so viel Energie wie möglich des Akkus zu nutzen wurde ein linearer Spannungswandler verwendet. Es wurde ein sogenannter „Low Quiescent Current Low dropout voltage regulator MCP1700“ verwendet, weil dieser einen sehr geringen Eigenverbrauch von 1,6  $\mu$ A besitzt [5].

Der lineare Spannungswandler sorgt für eine Ausgangsspannung von 3,3 V solange die Eingangsspannung oberhalb 3,3 V liegt. Laut Datenblatt ist die minimal notwendige Spannungsdifferenz bei 0,1 V, sodass die Eingangsspannung minimal 3,4 V betragen muss. Dies konnte in Tests jedoch nicht bestätigt werden, auch unter Last haben 3,3 V als Eingangsspannung ausgereicht. Dies ist in Abbildung 1 dargestellt. Des Weiteren war es möglich die Eingangsspannung auf unter 3,3 V absinken zu lassen, wobei die Spannung direkt weitergeleitet wurde, sodass am Ausgang die gleiche Spannung wie am Eingang vorlag. Dieses Verhalten ist für die Messstation optimal, da der Mikrocontroller immer mit Strom versorgt wird. Dadurch ist dieser immer aktiv, bis die Eingangsspannung nicht mehr ausreicht, um den Mikrocontroller arbeiten zu lassen.



**Abb. 1:** Spannungsverlauf des linearen Spannungswandlers für 3V

Um die Lebenszeit des Akkus zu maximieren, soll die Ladung des Akkus zwischen 20 % und 80 % gehalten werden. Dies ist möglich, da der Zusammenhang zwischen Ladung und Akkuspannung sehr linear verläuft [3,4]. Durch Messkurven zwischen Kapazität und Spannung sowie Überwachung des Stromes zu und vom Akku kann die Ladung des Akkus bestimmt werden und entsprechend reagiert werden. Demzufolge würde ab 80 % Ladung jedes weitere Laden gestoppt werden und ab unter 20 % Ladung würden alle Messungen auf ein Minimum reduziert, um so wenig wie möglich Strom zu verbrauchen. Außerdem könnten die Messintervalle mit steigender Akkuladung verkleinert werden, sodass mehr Sensordaten verfügbar sind.

Um nicht unnötig Strom zu verbrauchen soll nur gesendet werden, wenn sich Sensorparameter geändert haben, jedoch sollen alle gemessenen Werte auf einer SD-Karte gespeichert werden. Dadurch gehen keine Daten verloren, sollte eine Funkverbindung nicht möglich sein. Um auch feststellen zu können, ob die Messstation noch aktiv ist, muss mindestens einmal pro Tag ein minimaler Datensatz gesendet werden. Dieser würde Akkuladung, Akkutemperatur, Zeit und Restspeicherkapazität der SD-Karte enthalten.

In den Intervallen zwischen den Messungen werden nur so wenig Komponenten wie nötig mit Strom versorgt und der Rest abgeschaltet, um dadurch den Stromverbrauch zu minimieren. Immer mit Strom versorgt wird die Real Time Clock (RTC), der Mikrocontroller und der Akku Monitor Chip. Die Stromversorgung zu allen anderen Komponenten und Sensoren werden mithilfe von MOSFETs geschaltet. Dieses Design stellt sicher, dass Komponenten die von sich aus nicht über Schlafmodi verfügen, trotzdem abgeschaltet werden können. Der Mikrocontroller selbst wird in einen Schlafmodus gesetzt, indem so wenig interne Komponenten wie möglich aktiv sind und dadurch der Stromverbrauch minimal ist.

Wie bereits erwähnt soll der Strom von erneuerbaren Energien bezogen werden, in Form eines Fotovoltaik-Elements. Da für stationäre Anwendungen der Messstation mit fester Installation geplant ist, auch Windenergie zu unterstützen, müssen Rückströme zu den einzelnen Stromerzeugern verhindert werden. Diese entstehen, wenn nur eine Komponente aktiv ist und führt dazu, dass die inaktiven Komponenten den Strom verbrauchen. Durch Schottky-Dioden mit geringem Spannungsverlust konnte dieses Problem erfolgreich gelöst werden.

Aufgrund von äußeren Einflüssen, wie Frost oder längeren Schlechtwetterphasen, kann von vornherein nicht genau bestimmt werden, ob die Solarzelle und der Li-Ion Akku ausreichend dimensioniert sind. Deswegen wurde eine Notfallstromversorgung vorgesehen, die ein weiteres Arbeiten der Messstation ermöglicht. Dadurch können im Fehlerfall weiterhin Daten erfasst werden, zudem sorgt ein Fehlerfall nicht für den vollständigen Zusammenbruch des Systems. Die Stromquelle wird ebenfalls durch MOSFETs gesteuert, sodass nur im Notfall Strom fließen kann. Als Stromquelle wurde sich für einen 6 V Blei-Gel Akku entschieden, da diese nur sehr geringe oder keine Alterungserscheinung besitzen, wenn sie über eine längere Zeit bei voller Ladung gehalten werden. Als Hauptakku sind sie jedoch ungeeignet, da zyklischer Betrieb schnell zu signifikanten Kapazitätsverlusten führt. [6]

#### *Kommunikation und Senden der Daten*

Zum Senden der Daten wurde sich für Long Range Wide Area Network, LoRaWAN, entschieden. Es gehört zu den Low Power Wide Area Networks, LPWAN, genau wie Zigbee. LoRaWAN ist Energie effizient, sodass für wenige mW bereits eine Reichweite von fünf bis zehn Kilometer erreicht werden können. Zigbee besitzt nur eine Reichweite von etwa fünf Kilometern. Außerdem ist Zigbee

echtzeitfähig, sodass Daten mit geringer Latenz übertragen werden. Dadurch ist der Energieverbrauch höher, aber Steueranwendungen sind möglich. Zudem bilden die einzelnen Zigbee Geräte („Nodes“) ein Mesh-Netzwerk aus, sodass jedes Gerät mit jedem kommunizieren kann. LoRaWAN bildet ein Sternnetzwerk aus, bei dem der zentrale Punkt ein Gateway ist. Dieses Gateway verbindet in der Regel die LoRaWAN Geräte mit einem Netzwerk über das Internet. LoRaWAN sendet Daten nur in Intervallen von zwei bis fünf Minuten, so dass die Daten nicht in Echtzeit übertragen werden können. Außerdem besitzt Zigbee eine Empfangsbestätigung der Pakete, sodass sichergestellt wird, dass alle gesendeten Pakete auch ankommen sind. Zusätzlich kann sich das Zigbee Netzwerk selbst heilen und alternative Routen finden, sollte ein Node ausfallen. Da bei LoRaWAN keine Empfangsbestätigung gesendet wird, kann der Paket- und somit Datenverlust je nach Umgebung sehr hoch ausfallen. In solchen Fällen ist es jedoch fraglich ob ein erneutes Senden der Daten eine Besserung bringen würde [7].

Die langen Sendeintervalle für LoRaWAN sind in der geplanten Anwendung zu vernachlässigen. Da sich Umweltparameter nicht so schnell ändern. Es sollen nur Daten gesendet werden, daher wird keine aktive Steuerung benötigt, sodass eine beidseitige Kommunikation wie sie von Zigbee ermöglicht werden würde, nicht benötigt wird. Zudem ist die Zigbee Hardware deutlich komplexer als die von LoRaWAN Modulen. Es gibt kaum frei zugängliche Dokumentationen, da es sich um einen Industriestandard handelt. Außerdem wird häufig eine spezielle Software benötigt, welche dazu erworben werden muss. Die Funkmodule selbst liegen preislich in einem sehr ähnlichen Bereich, jedoch sorgen die zusätzlich benötigten Softwarelizenzen für einen hohen Preis, im Fall von Zigbee Modulen. Daher wurde sich dazu entschieden LoRaWAN zur Kommunikation zu verwenden, da es kostengünstig, Low-Power geeignet und sehr gut dokumentiert ist.

#### *Sensoren*

Das Fotovoltaik-Element selbst ist ungeeignet, um neben der Stromversorgung noch zur Helligkeitsbestimmung genutzt zu werden, da Spannung und Strom gemessen werden müssen. Dieser Zusammenhang ist nicht linear und auch von der Last abhängig. Deswegen wurde sich für einen zusätzlichen digitalen Luxsensor entschieden.

Für Temperatursensoren wurde sich für einen 1-wire Temperatursensor entschieden, da diese einen sehr geringen Stromverbrauch besitzen und nur einen Pin zur Kommunikation benötigen. Zudem sind diese Sensoren sehr einfach in einer Messkette zu verwenden, da sie parallel geschaltet werden können.

Um Gasparameter wie den CO<sub>2</sub>-Gehalt messen zu können werden Gas-Sensoren benötigt z.B. Halbleitende metalloxidische Gassensoren nach dem Taguchi-Prinzip von der Firma FIGARO. Es existieren weitere Sensorverfahren z.B. nicht dispersives Infrarot (NDIR) oder Photo Acoustic Spectroscopy. Diese benötigen jedoch

teilweise zusätzlich 12 V [8] oder 5V mit großen Spitzenströmen [9]. Taguchi Sensoren benötigen eine hohe Arbeitstemperatur, die mithilfe von Heizelementen erreicht wird [10]. Demzufolge verbrauchen sie viel Strom, sodass ein Dauerbetrieb nicht möglich ist, wenn nur durch erneuerbare Energien Strom bereitgestellt wird, z.B. der Stromverbrauch für den Taguchi Sensor TGS4161 liegt bei 50mA [10]. Aus diesem Grund wurde sich dazu entschieden, dass nur wenn die Akkuladung bei 80 % oder darüber ist, diese Sensoren zu aktivieren. Dies hat zum Nebeneffekt, dass eine Überladung des Akkus vermieden wird, sodass die Lebenszeit der Li-Ion Akkus vergrößert werden sollte.

Da die Messstation auch mobil eingesetzt werden soll, ist sie mit einem GPS Modul ausgestattet. Da dies jedoch verhältnismäßig viel Strom verbraucht, wurden auch ein drei Achsen Beschleunigungssensor und ein Gyroskop verwendet. Diese sind Mikro-Elektromechanische Systeme (MEMS) und verbrauchen im Vergleich zu dem GPS Modul weniger als ein Hundertstel der Energie. Somit ist es möglich die Initialposition mithilfe von GPS zu bestimmen und weitere Positionsbestimmungen anhand der Beschleunigung und Rotation der Messstation mithilfe von Integration zu errechnen. Bei ausreichender Akkukapazität kann erneut die Position über GPS bestimmt werden, um den entstehenden Fehler zu minimieren. Typische Wetterparameter wie Luftdruck, Windstärke, Windrichtung und Luftfeuchtigkeit sollen ebenfalls erfasst werden.

Ein weniger verbreiteter Sensor ist der Blitzsensor AS3935, der auf Basis von einer 500 kHz Antenne Blitze erkennen kann. Dazu werden die Signale auf der Frequenz analysiert und eingeteilt in echte und künstliche Blitze. Zu Beginn muss für optimale Ergebnisse softwaregesteuert zunächst die Impedanz angepasst werden. Außerdem wird die Distanz anhand der Energie abgeschätzt, sodass Blitze mit bis zu 40 km Entfernung gemessen werden können. Das genaue Messprinzip ist nicht erklärt, vermutlich um billige Imitate zu verhindern. Es ist denkbar damit ein Frühwarn-System zu verbinden, wenn aus den anderen Sensordaten ein Unwetter mit starken Regenfällen hervorgeht. Außerdem soll es möglich sein, durch Verbindung der Daten mehrerer Messstationen an unterschiedlichen Orten, die genaue Position und Ausdehnung von Gewitterfronten zu errechnen.

## Implementierung

Als Mikrocontroller wurde sich für die ESP-Serie von Espressif entschieden, da diese gut dokumentiert und WLAN-fähig sind. Konkret wurde ein ESP32 verwendet da dieser im Aktiv- und Schlafzustand den geringsten Stromverbrauch besitzt, wie aus Tabelle 1 hervorgeht.

**Tab. 1:** Verbrauch der ESPs

Modus	Board ESP8266-01	ESP8266-01S	ESP-WROOM-32
aktiv	73,5 ± 0,1 mA	70, 5 ± 0, 1 mA	39, 4 ± 0, 1 mA
Http Server	74 ± 4 mA	69 ± 2 mA	64 ± 10 mA
Wifi Scan	71 ± 1 mA	68 ± 1 mA	115, 2 ± 0, 1 mA
Schlaf	0, 346 ± 0, 001 mA	0, 018 ± 0, 001 mA	0, 005 ± 0, 001 mA

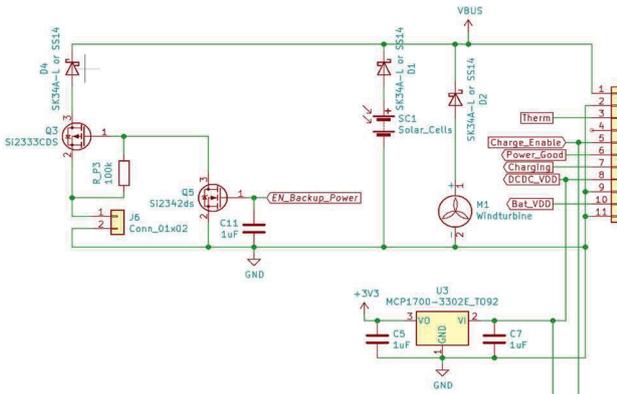
### Datenabholung

Dank der WLAN-Funktion des Mikrocontrollers ist es möglich die Daten der Messstation einzusammeln, ohne dass das Gehäuse geöffnet werden muss. Zudem kann dadurch auch ein Softwareupdate erfolgen. Es ist denkbar, dass durch z.B. per Knopfdruck ein WLAN Hotspot durch den Mikrocontroller geöffnet wird und sich ein Laptop oder Smartphone mit diesem WLAN verbindet. Anschließend kann von einer Website auf die SD-Karte zugegriffen und alle Daten heruntergeladen werden.

Zur Kommunikation wird das LoRa Modul RFM95W für 868 MHz verwendet. Die Kommunikation funktioniert mithilfe des SPI Protokolls, es hat 5 Anschlüsse mit programmierbaren Interrupts, von diesen werden nur 2 für LoRaWAN Kommunikation benötigt. Die weiteren Anschlüsse sind wichtig, wenn andere Protokolle verwendet werden, welche die Kontrolle von tieferen internen Komponenten voraussetzen. Abhängig von Land sind für LoRa verschiedenen Frequenzen freigegeben, z.B. wird in Europa 868 MHz und in den USA 915 MHz verwendet.

Um die Stromversorgung der Komponenten wie Sensoren, Funkmodule und SD-Karte zu steuern, werden P-Kanal MOSFETs, PMOS, vom Typ Si2333CDS verwendet. Diese schalten bereits mit geringen Spannungen und haben bei einer Gate-Source Spannung von -1.8 V bereits einen Drain-Source Widerstand von nur 0,059 Ω [11]. Wenn der Mikrocontroller im Schlafzustand ist, werden alle Ein- und Ausgänge abgeschaltet. Damit das Gate der PMOS trotzdem einen definierten Zustand hat, werden alle durch einen Pull-Up Widerstand von 100 kΩ auf 3.3 V gezogen. Dadurch fließt im aktiven Zustand der Komponenten ein vernachlässigbar kleiner Strom von 33 µA pro Komponente.

Für die Backup Stromversorgung wurde ein komplexeres Design gewählt. Da auch weiterhin Backupstrom genutzt werden soll, wenn der Mikrocontroller schläft, muss das Gate weiterhin auf Ground liegen, damit der PMOS offen ist. Dafür wird ein N-Kanal MOSFET, NMOS, verwendet. Das Gate des NMOS wird durch einen Kondensator auf 3,3 V gehalten, wenn der Mikrocontroller schläft. Der verwendete NMOS gehört der SI2342DS Serie an und besitzt bei einer Gate-Source Spannung von 1.8 V bereits einen Drain-Source Widerstand von nur 0,022 Ω, sodass die Verluste vernachlässigbar klein sind.



**Abb. 2:** Ausschnitt des Schaltplans zur Stromversorgung.

Der verwendete Solarladeregler ist von Adafruit Industries und basiert auf einem BQ2474. Dieser versucht erst die Ladespannung zu nutzen, um unnötige Lade-Entlade-Zyklen des Akkus zu verhindern. Es wird versucht so viel wie möglich Strom zu nutzen, jedoch nie so viel, dass die Ladespannung unter 4,5 V einbricht [12]. Der Solarladeregler besitzt einen Pin mit dem das Laden des Akkus gesteuert werden kann. Wenn dieser Pin auf HIGH gezogen wird, stoppt das Laden des Akkus. Da auch, wenn der Mikrocontroller schläft, der Akku nicht mehr geladen werden soll. Falls er ausreichend geladen ist, wird der Pin mithilfe eines PMOS auf HIGH gezogen. Das Gate des PMOS wird mithilfe eines Kondensators auf LOW gehalten, dies ist in Abbildung 2 dargestellt.

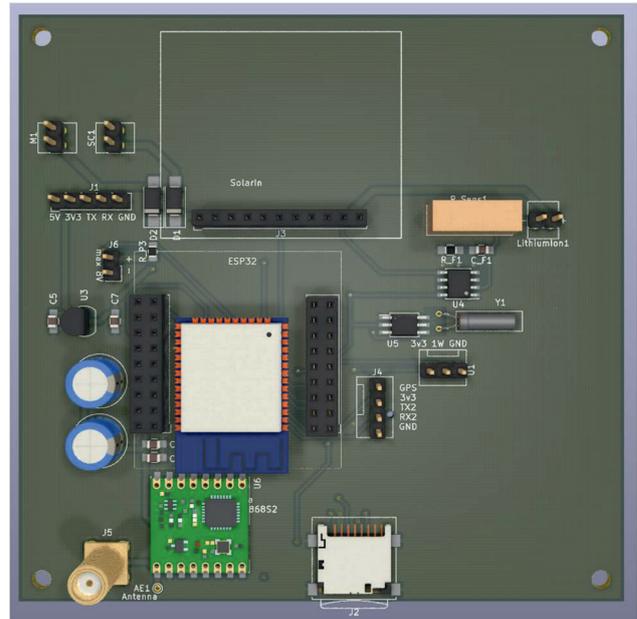
Für die Positionsbestimmungen wurde das GY-Neo6Mv2 GPS Modul verwendet. Es verbraucht mit bis zu 70 mA vergleichsweise viel Strom und soll deswegen so selten wie möglich verwendet werden. Bei stationären Anwendungen ist nur eine initiale Positionsbestimmung sinnvoll, sodass das Ergebnis gespeichert wird. Durch den PMOS wird die Stromversorgung abgestellt, sodass nur wenn die Position bestimmt werden soll, das Modul Strom verbraucht.

Auch die Stromversorgung des SD-Karte kann abgeschaltet werden. Je nach Hersteller der SD-Karte verbrauchen sie einen großen Strom im sogenannten Idle-Zustand von bis zu 30 mA. Die SD-Karte befindet sich im Idle-Zustand, wenn sie mit Strom versorgt wird, aber nicht aktiv genutzt wird. Es kann dabei vorkommen, dass nach einer erfolgreichen Kommunikation die Karte mehr Strom verbraucht als vor der Kommunikation, da intern die Karte in einen anderen Zustand gewechselt ist. Dieses Verhalten ist jedoch abhängig von Hersteller und Karten Type, bei manchen Karten kann ein Reset-Befehl den Stromverbrauch reduzieren, jedoch ist dieses Verhalten nicht dokumentiert. Zusätzlich verringert das Abschalten der SD-Karte die Gefahr von Datenkorruption, da die SD-Karte nur kurz, wenn auf die Daten zugegriffen wird, mit Strom versorgt wird.

Zur Zeiterfassung wird die Real-Time-Clock, RTC, DS2417 verwendet. Es wurde sich dazu entschieden eine externe RTC und nicht die interne RTC des ESPs zu verwenden, da diese mit einer geringeren Spannung als der Mikrocontroller weiter zählt. Dadurch kann auch nach

einem Fehlerfall weiterhin mit korrekter Zeit Messwerte genommen werden. Mithilfe der GPS-Daten kann die Zeit exakt gesetzt werden, sodass keine Verbindung zu einem Network Time Protokoll (NTP) Server notwendig ist.

Um den Akku zu überwachen, wird ein DS2438 verwendet. Es werden die Akkuspannung und der Strom gemessen. Zusätzlich besitzt der Chip einen internen Oszillator, sodass die Ladung direkt gemessen werden kann. Außerdem kann die Temperatur gemessen werden, sodass bei Temperaturen unterhalb des Gefrierpunkts der Akku nicht geladen wird, um Dendritenbildung zu verhindern. Diese könnten einen Kurzschluss im Akku verursachen und somit im schlimmsten Fall für ein Feuer sorgen.



**Abb. 3:** Gerenderte Darstellung des PCB Prototypen

Die PCB, in Abb. 3 dargestellt, wurde mit der Möglichkeit erstellt sie zu erweitern. Da Sensoren die über SPI kommunizieren ein extra Signal brauchen um sie zu starten, den Chip Select, CS, ist ein GPIO Expander notwendig für weitere Sensoren. Ein GPIO Expander erweitert die verfügbaren Ein- und Ausgänge und kann in der Regel mithilfe von I2C gesteuert werden. Außerdem sind die Ein- und Ausgänge des ESP32 begrenzt, sodass ein GPIO Expander notwendig ist. Durch dieses Design ergibt sich die Möglichkeit mehrere Sensorplatinen zu stapeln. Die Hauptplatine übernimmt das Energiemanagement und die Kernkomponenten wie Kommunikation und Speicherung der Daten. Dadurch ist es auch möglich andere Mikrocontroller zu verwenden, so lange die gleichen Anschlüsse genutzt werden.

## Einsatzgebiet

Die Messstation soll sowohl stationär als auch mobil einsetzbar sein. Das Ziel soll dabei sein, möglichst viele und genaue Daten über einen längeren Zeitraum aufzunehmen. Dies soll dabei helfen Klimaveränderungen zu messen und Vorhersagen zu treffen.

Um ein möglichst großes Gebiet mit einem LoRaWAN Gateway abzudecken sollte Sichtkontakt zwischen Sender und Empfänger bestehen. Somit eignen sich besonders die Dächer von hohen Gebäuden oder Funkmasten als Position für ein Gateway. Auch die verwendeten Antennen können die Reichweite beeinflussen. Für stationäre Anwendungen der Messstation und bekannter Position des Gateways kann eine Richtantenne benutzt werden, um über eine große Distanz Funkkontakt zu etablieren.

Bei fester Installation der Messstation ist die Position wichtig, da sie die Messwerte beeinflusst. Wenn keine externe Stromquelle benutzt wird, sondern stattdessen Solar, sollte die Position möglichst ohne Schatten und in Richtung Süden liegen, für eine optimale Lichtmenge. Die Höhe der Messstation hat einen Einfluss auf die Druck- und Wind-Messung. Die Windrichtung kann durch Gebäude verändert sein, mit steigender Höhe steigt auch die Windstärke und der Druck sinkt mit steigender Höhe.

Ein mobiles Einsatzgebiet wäre z.B. auf einem Schiff als Teil des RoBiMo Projekts zur Gewässerüberwachung. Auf dem Schiff ist die Stromversorgung gesichert, jedoch muss das Gehäuse wasserdicht sein, um die Elektronik nicht zu beschädigen. Unter normalen Witterungsbedingungen würde ein Gehäuse mit Schutzklasse IP66 gegen Regen ausreichen, auf dem Schiff ist jedoch mindestens IP67 zu verwenden. Außerdem soll das Gehäuse nicht größer als die Solarplatte sein, um den Platz optimal zu nutzen. Die hier verwendete Solarplatte soll 11,3 cm x 13,5 cm groß sein. Diese hat eine Nennleistung von 6 V und 2 W. Der Akku besitzt eine Kapazität von 600 mAh. In den Wintermonaten ist die Sonneneinstrahlung am geringsten, sodass das System für diese Energiemenge optimiert werden muss.

**Tab. 2:** Stromwerte einer 6 V 2 W Solarzelle im Winter, hinter einer Glasscheibe mit westlicher Ausrichtung.

Sonne	I in mA
bedeckt, indirektes Licht	5 ± 1
Sonnenschein, indirektes Licht	8 ± 1
direkt, durch Wolken	27 ± 1
direkt, ohne Wolken	49 ± 1

In der hiesigen Region gibt es mit etwa 100 Stunden im Dezember und Januar die geringste Sonneneinstrahlung [2]. Somit ergeben sich im Durchschnitt 3,2 h Sonne pro Tag. Mit den Experimentell bestimmten Werten aus Tabelle 2 ergeben sich somit bis zu  $3,2 \text{ h} * 49 \text{ mA} = 156,8 \text{ mAh}$  pro

Tag. Auch wenn keine direkte Sonne scheint, was im Winter kein seltener Fall ist, würden trotzdem bei einer Tageslänge von 6 h insgesamt 30 mAh generiert. Somit ist das Ziel das System so weit zu optimieren, dass es weniger als 30 mAh pro Tag verbraucht. Wenn dieses Ziel erreicht wird, kann die Messstation mit dem bereits genannten 600mAh Akku für 20 Tage messen. Da jedoch die Akkuladung im Bereich von 20 % - 80 % gehalten werden soll, reduziert sich die maximale Messzeit auf 12 Tage.

## Ausblick

Durch Lieferengpässe und Knappheit von Bauelementen hat sich der Bau des Prototypen stark verspätet, sodass noch keine Messwerte vorliegen. Einzelne Komponenten wurden getestet, jedoch nie als komplettes System.

Ein weiterer Betrachtungspunkt ist die Verwendung eines Gehäuses mit durchsichtigem Deckel. Dort muss getestet werden ob die Solarplatte noch ausreichend Energie zur Verfügung stellt. Außerdem müssen die Sensoren und deren Kabel aus der Messbox herausgeführt werden. Dabei muss sichergestellt werden, dass die Schutzklasse IP66 bzw. IP67 weiterhin eingehalten wird. Bohrungen für die Kabel können zwar versiegelt werden, jedoch kann es bei ausreichend Druck vorkommen, dass das Wasser in die Kabel eindringt und somit in das Gehäuse gelangen könnte. Für dieses Problem müssen Lösungen gefunden werden.

Die Chemie der Lithiumionen Akkus ist nicht für extrem warme oder kalte Bedingungen geeignet, sodass für Messungen in Polarregionen oder in Äquatornähe anderen Stromversorgungen gefunden werden müssen.

Wenn die Messstation an hohen Gebäuden platziert wird steigt die Gefahr von Blitzeinschlägen, welche zur Zerstörung des Systems führen können, dies sollte verhindert werden.

Wenn die Messstation an einem Wetterballon verwendet werden soll, muss die Backup Stromversorgung geändert werden, da der Bleiakku das Gewicht der Station sehr stark erhöht. Auch ist die Ausrichtung der Solarplatte an einem Wetterballon nicht direkt möglich, sodass die Stromversorgung sichergestellt werden muss.

## Literatur

- [1] LEHMANN, M.: Umweltmonitoring basierend auf der 1-Wire Bustechnik (Sensormesskette). 2022
- [2] Alexander Merkel. Klima Freiberg: Wetter, Klimatabelle & Klimadiagramm für Freiberg. 2019. url: <https://de.climate-data.org/europa/deutschland/sachsen/freiberg-25567/#climate-graph> (besucht am 16. 11. 2021).
- [3] EEMB. Lithium Akku Datasheet, LIR18650 2600mAh. 2010.
- [4] EEMB. Lithium Akku Datasheet, lir2450. 2015.
- [5] Microchip Technology Inc.: Datasheet Low Quiescent Current LDO MCP1700, 2018
- [6] Tobias Handschuh. "Untersuchung des Betriebs- und Alterungsverhaltens von Blei-Säure-

Akkumulatoren bei für Hybridantriebssysteme typischen Belastungen“. Accepted: 2016-03-14T13:38:49Z. Dissertation. Universität Ulm, 21. Juni 2007. doi: 10.18725/OPARU-379. url: <https://oparu.uni-ulm.de/xmlui/handle/123456789/406> (besucht am 13. 10. 2022).

- [7] Luke Day. LoRaWAN vs Zigbee – Which Wireless IoT Network is the best for me? 6. Juli 2020. url: <https://www.linkedin.com/pulse/lorawan-vs-zigbee-which-wireless-iot-protocol-best-me-luke-day> (besucht am 03. 09. 2022).
- [8] Infineon Technologie AG. Datasheet XENSIV PASCO2V01. 13. Jul. 2022.
- [9] Zhengzhou Winsen Electronics Technologie Co., Ltd; Datasheet MH-Z19C NDIR CO2 Module. 31. Aug. 2020.
- [10] FIGARO ENGINEERING INC. Datasheet TGS4161 – for the detection of Carbon Dioxide. 03. April. 2022.
- [11] Vishay. Datasheet P-Mosfet Si23333cds. 24. Aug. 2020.
- [12] SIEPERT, B.; ADA, L.: *Universal USB / DC / Solar Lithium Ion/Polymer charger – bq24074*, Adafruit, 2021