

Praktische Konzeption einer Klimasonde



GEORG-WILHELM-STELLER-GYMNASIUM

ARBEIT AUS EINEM WISSENSCHAFTSPROPÄDEUTISCHEN
SEMINAR

vorgelegt von

Niclas Popp

8. November 2016

jugend  **forscht**

Korrektor: StR Dr. Stefan Bärthlein

Bewertung der Arbeit: ___ Punkte

Bewertung der Präsentation: ___ Punkte

Inhaltsverzeichnis

1 Entwicklung und Prototyping	4
2 Theoretische Grundlagen	5
2.1 Thermodynamische Betrachtung	5
2.2 Höhenbestimmung	6
2.3 Luftfeuchtigkeit	7
3 Praktische Umsetzung	9
3.1 Konstruktion des Gehäuses	9
3.2 Elektrotechnische Umsetzung	10
3.2.1 Konzeption der Heizung	10
3.2.2 Batteriemanagement	11
3.3 Messelektronik	13
4 Ergebnis	15
4.1 Die Höhenkurve	15
4.2 Analyse der Luftfeuchtigkeit	20
5 Zusammenfassung und Ausblick	21
6 Danksagung	21
7 Erklärung	23

1 Entwicklung und Prototyping

Wetterballone bieten der Menschheit seit über 120 Jahren die Möglichkeit erdnahe Atmosphärenschichten zu untersuchen [2]. Während es sich bei den ersten Flügen um teils gefährliche Unterfangen von Pionieren gehandelt hat, sind Stratosphärenflüge mittlerweile relativ einfach selbst durchzuführen. Aus diesem Grund bieten sie eine äußerst interessante Möglichkeit, mit der Entwicklung von Messelektronik verknüpft zu werden. Genau diese Synthese zwischen physikalischer Klimaforschung und elektrotechnischer Messtechnikentwicklung findet sich auch in diesem Projekt wieder.

Ziel war es eine für stratosphärische Bedingungen geeignete Klimasonde zu konzipieren, mit deren Hilfe klimatologische Effekte in der Atmosphäre bis in eine Höhe von 30 km erforscht werden können.

Zusammen mit meinem Projektpartner Simon Stadlinger wurde im Laufe des Jahres 2016 eine derartige Idee verwirklicht. Da zu Beginn äußerst unklar war, wie dieses Ziel erreicht werden kann, wurde die Vorgehensweise des Prototypings gewählt. "Ein Prototyp eines Systems ist eine frühe ausführbare Version, die bereits die relevanten grundlegenden Merkmale des späteren Produkts aufweist. Als Prototyping wird die Vorgehensweise bezeichnet, Prototypen solange inkrementell zu entwickeln, zu bewerten und zu verfeinern, bis das endgültige Produkt entstanden ist." [3] So konnte die Messtechnik Schritt für Schritt entwickelt werden. Während der erste Prototyp Testzwecken diente, wurde der zweite in der Stratosphäre eingesetzt. Dieser umfasst die gesamte in dieser Arbeit beschriebene Elektronik, die Messwerte erfasst und aufzeichnet. Dazu zählen Lufttemperatur, -druck, -feuchtigkeit, dreidimensionale Beschleunigung und Winkelbeschleunigung, Strahlungsintensität des sichtbaren Lichts, dreidimensionale Magnetfeldstärke über ein Kompassmodul, die Koordinaten über ein GPS-Modul sowie die Konzentration der Gase CO₂ und O₃. Daraus lassen sich Größen wie die Höhe, die Lage und Größe der Wolkenschichten oder das Volumen des Ballons berechnen.

Inhalt dieser Arbeit ist es, den Stand des Projekts im Bezug auf die Hardwareentwicklung der Messelektronik sowie der Auswertung der gewonnenen Daten systematisch wiederzugeben. Zu Beginn werden die theoretischen Grundlagen der zu erwartenden Effekte erläutert. Dazu zählt neben der physikalischen Definition der Messgrößen und deren Abschätzung auch die Herleitung geeigneter Verfahren zur Auswertung der Messgrößen. In Kapitel 2 wird die tatsächliche Vorgehensweise beim Bau der Sonde beschrieben. Dazu gehört die Konstruktion eines Gehäuses wie auch die Entwicklung der Technik. In Kapitel 3 werden die Ergebnisse der Auswertung eines ersten Fluges präsentiert.

2 Theoretische Grundlagen

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den für Stratosphärenflüge relevanten physikalischen Effekten bezüglich der drei Größen Temperatur, Druck und Feuchtigkeit in der Atmosphäre. Zunächst wird auf deren Wärmeaustausch zwischen dem Inneren der Sonde und der Umgebung, sowie die daraus resultierende Innentemperaturänderung eingegangen. Anschließend werden Verfahren hergelitten, mit denen sich aus den Messdaten Größen wie die Dichte der atmosphärischen Luft und die vertikale Position bestimmen lassen.

2.1 Thermodynamische Betrachtung

Außentemperatur und Wärmefluss Der atmosphärische Temperaturgradient liegt in der Troposphäre bis zu einer Höhe von 11 Kilometern bei $-\frac{1}{100} \frac{\text{K}}{\text{m}}$ bei trockener bis $-\frac{0,2}{100} \frac{\text{K}}{\text{m}}$ bei sehr feuchter Luft[1]. In der darüber liegenden Stratosphäre nimmt die Temperatur bis auf -50°C ab. Als Abschätzung reicht es zu sagen, dass bei einer möglichst konstanten Innentemperatur von 10°C eine Differenz zur Außentemperatur von 60°C im Extrempunkt aufrecht erhalten werden muss. Die Verlustleistung \dot{Q}_v lässt sich über den Wärmewiderstand R_{th} ausdrücken[1]:

$$\dot{Q}_v = \frac{\Delta T}{R_{\text{th}}} \quad (1)$$

Der Wärmewiderstand ist materialspezifisch. Aus praktischen Gründen wurde die Außenhülle aus Styropor gefertigt. Die Kantenlänge des verwendeten Würfels beträgt 20 cm, die Dicke des Materials 4 cm. Über die Querschnittsfläche A , die Dicke l , sowie der spezifischen Wärmeleitfähigkeit λ lässt dieser sich wie folgt berechnen:

$$R_{\text{th}} = \frac{l}{\lambda A} \quad (2)$$

Für extrudiertes Polystyrol gilt im Mittel $\lambda = 0,04 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$ [16]. Der Wärmewiderstand einer Seitenwand beträgt:

$$R_{\text{th}} = \frac{0,04 \text{ m}}{0,04 \text{ m}^2 \cdot 0,04 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}} = 25 \frac{\text{K}}{\text{W}} \quad (3)$$

Die einzelnen Widerstände der sechs Wände addieren sich zu einem Gesamtwiderstand von 150 W. Für den Wärmefluss ergibt sich:

$$\dot{Q}_v = \frac{60\text{K}}{150 \frac{\text{K}}{\text{W}}} = 0,4\text{W} \quad (4)$$

Innentemperatur Auf den ersten Blick sollte ein derartiger Wärmefluss für die Messeinheit kein Problem darstellen. Allerdings zeigt der Temperaturfluss wie wichtig dessen Betrachtung ist. Der Wärmestrom ist die zeitliche Änderung der Wärme:

$$\dot{Q}_v = \frac{dQ}{dt} \quad (5)$$

Die thermische Energie im Inneren der Box sinkt bei den angegebenen Temperaturen um 0,4 J. Darüber lässt sich die Temperaturänderung bestimmen durch:

$$\Delta T = \frac{Q}{c \cdot m} \quad (6)$$

Mit der spezifischen Wärmekapazität $c = 1,005 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$ von Luft [1]. Die Masse der sich im Inneren befindenden Luft beträgt:

$$m = V \cdot \rho = \frac{1}{125} \text{m}^3 \cdot 1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \frac{1}{125} \text{kg} \quad (7)$$

Dabei wurde die in Abschnitt 4.1 errechnete Dichte beim Eintritt in die thermisch kritische Phase verwendet. Es ergibt sich also folgende Temperaturänderung:

$$\Delta T = \frac{0,4 \text{J}}{1,005 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \frac{1}{125} \text{kg}} = 49,75 \text{K} \quad (8)$$

Diese Temperaturänderung verdeutlicht, wie wichtig es ist eine Heizung zur Temperaturstabilisierung einzubauen.

2.2 Höhenbestimmung

Von großem Interesse bei einem derartigen Flug ist die erreichte Höhe. Neben der direkten Höhenangabe durch das GPS-Modul, lässt sich die vertikale Position auch über den Druck, die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit bestimmen. Angesetzt wird hierbei mit der barometrischen Höhenformel. Die aus der Hydrostatik hervorgehende Gleichung lautet [1]:

$$p(h_1) = p(h_0) \cdot e^{-\frac{\Delta h}{h_s}} \quad (9)$$

Dabei beschreibt $p(h_0)$ den ersten gemessenen Druckwert, $p(h_1)$ den Aktuellen. $\Delta h = h_1 - h_0$ ergibt die Höhendifferenz. h_s ist die Skalenhöhe. Nach der Höhe aufgelöst ergibt sich:

$$\Delta h = -\ln \frac{p(h_1)}{p(h_0)} \cdot h_s \quad (10)$$

Um die Skalenhöhe zu berechnen werden die universelle Gaskonstante $R = 8,314 \frac{\text{J}}{\text{molK}}$, die Molare Masse der Luft, die Temperatur und der Ortsfaktor benötigt. Es gilt [1]:

$$h_s = \frac{RT}{Mg} \quad (11)$$

Neben der Temperatur ändert sich durch die nichtkonstante relative Luftfeuchtigkeit auch die Molare Masse der atmosphärischen Luft mit zunehmender Höhe. Diese kann über die Luftdichte bestimmt werden. Der Zusammenhang zwischen dem Druck p und der Luftdichte ρ lautet [1]:

$$\rho = \frac{p}{R_f T} \quad (12)$$

Hierbei beschreibt R_f die Gaskonstante der feuchten Luft. Diese berechnet sich wie folgt [18]:

$$R_f = \frac{R_1}{1 - \varphi \frac{p_d}{p} \left(1 - \frac{R_1}{R_d}\right)} \quad (13)$$

Dabei steht $R_1 = 287,058 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$ für die Gaskonstante trockener Luft, $R_d = 461,523 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$ für die Gaskonstante von Wasserdampf, φ für die relative Luftfeuchtigkeit und p_d für den Sättigungsdampfdruck. Wird angenommen, dass die Wassertropfen in der Luft lokal eine näherungsweise ebene Oberfläche besitzen, lässt dieser sich durch:

$$p_d(T) = 6,112 \text{hPa} \cdot e^{\frac{17,62T}{243,12^\circ\text{C}+T}} \quad (14)$$

über die Temperatur T in $^\circ\text{C}$ bestimmen. Der Zusammenhang:

$$M = \frac{R}{R_f} \quad (15)$$

mit der universellen Gaskonstante R liefert die Molare Masse der feuchten Luft. Somit wurden nahezu alle Einflussfaktoren, die auf die Genauigkeit der barometrischen Höhenformel einwirken mit berücksichtigt.

2.3 Luftfeuchtigkeit

Zur Beschreibung der Feuchtigkeit der Atmosphärenluft gibt es im Allgemeinen drei verschiedene Möglichkeiten. Die absolute Luftfeuchte:

$$f = \frac{m_{H_2O}}{V} \quad (16)$$

gibt die Masse an Wasser pro Kubikmeter an. Die maximale Luftfeuchte beschreibt die maximale absolute Luftfeuchtigkeit in der Luft. Diese liegt vor, wenn der Partialdruck f_{max} des Wassers den

Sättigungsdampfdruck erreicht hat. Es gilt dann:

$$p_{\text{partial}}(T) = p_{\text{Saettigung}}(T) \quad (17)$$

$$6,112 \text{hPa} \cdot e^{\frac{17,62T}{243,12^\circ\text{C}+T}} = f_{\text{max}} \cdot R_f \cdot T \quad (18)$$

Die relative Luftfeuchte:

$$\varphi = \frac{f}{f_{\text{max}}} \quad (19)$$

gibt das Verhältnis der tatsächlich Enthaltenen zur maximal möglichen Menge von Wasserdampf in der Luft an. Diese wurde letztendlich gemessen.

3 Praktische Umsetzung

Dieses Kapitel ist in zwei Teile gegliedert. Im Ersten wird die Konstruktion des Gehäuses und dessen Befestigung am Ballon beschrieben. Im zweiten Teil wird auf den Aufbau der für die Messwerterfassung notwendigen Hardware eingegangen.

3.1 Konstruktion des Gehäuses

Konstruktion der äußeren Hülle Unabhängig von der eigentlichen Messtechnik muss die Sonde Stratosphärenflüge sicher und unbeschadet absolvieren können. Die Stabilität der äußeren Hülle sowie die sichere Befestigung der Elektronik sind hierbei von zentraler Bedeutung. Da sich die vorgefertigte Box zur thermischen Isolation aus extrudiertem Polystyrol nicht zum Anschrauben der Bauteile eignet, muss eine innere Stütze aus härterem Material integriert werden. In der Praxis bietet es sich an Holz wie beispielsweise Pappel zu verwenden, da derartige Seitenwände leicht und spritzwasserschützend sind. Vor der Fertigung wurde ein CAD-Volumenmodell mittels der Software Blender [19] erstellt. Dieses ist auf Abbildung 1 zu sehen. Aufgrund der Traglastbeschränkung des Ballons von 1,5 kg wurde der kleinste verfügbare Würfel, in dem die gesamte Elektronik Platz findet, mit einer Kantenlänge von 20 cm verwendet. Die elektronischen Bauteile sind als dunkelgraue Kästen maßstabsgetreu dargestellt.

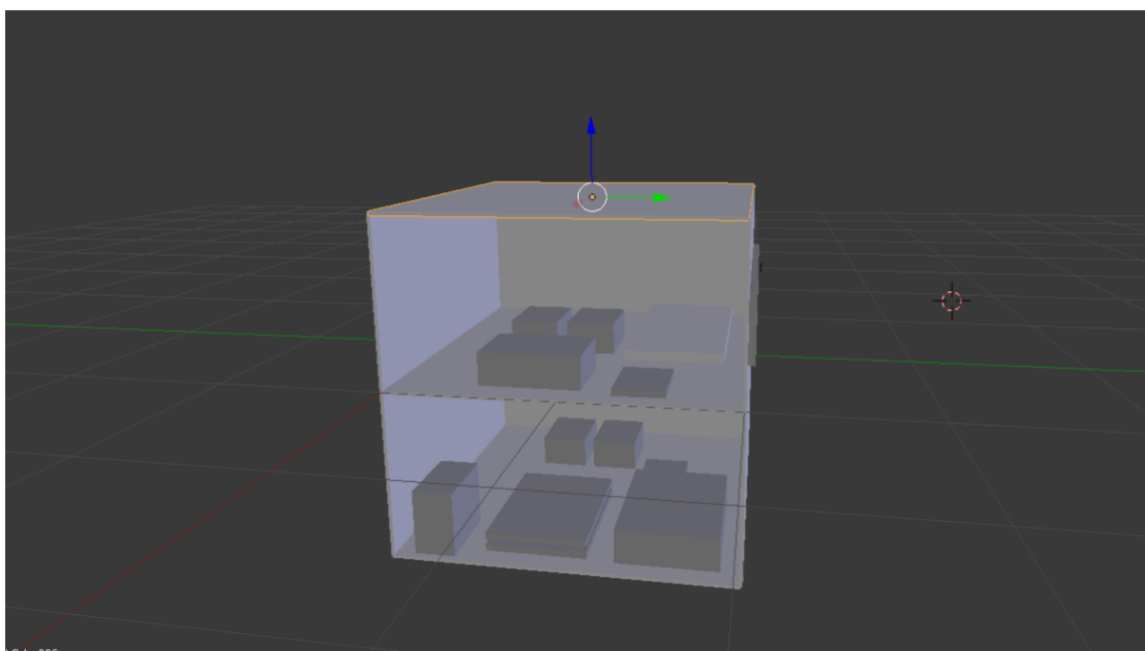


Abbildung 1: CAD-Volumenmodell der inneren Raumstruktur

Befestigung am Ballon Wichtig für die Gewährleistung einer sicheren Steig- und Sinkphase ist die Sicherung des Systems Sonde-Fallschirm-Ballon. Dabei ist die Wahl des richtigen Seils und dessen Dimensionierung von zentraler Bedeutung. Um kräftige und zum Teil ruckartige Beschleunigungen durch den Wind oder den aufgehenden Fallschirm gegenüber der Sonde kompensieren zu können, wurde eine elastische, aber dennoch reißfeste Schnur aus Kunststoff verwendet. Die Elastizität hat allerdings den Nachteil, dass sich während des Aufstiegs eine Schwingung in vertikaler Ebene einstellt, weshalb die Schnur nicht übermäßig lang gewählt werden sollte. Dennoch ist es wichtig den Abstand von 5 Metern vom Ballon zum Fallschirm und 10 Metern von diesem zur Sonde einzuhalten, um die Bergung zu erleichtern und die Messungen der Sonde nicht durch den Windschatten des Ballons zu verfälschen.

3.2 Elektrotechnische Umsetzung

Einer der wichtigsten Inhalte des Projekts ist die Konzeption einer Messeinheit, die während eines Flugs klimarelevante Daten aufzeichnet. Für den Umfang in der Messdatenerfassung betrieben wird, sind Microcontroller die beste Wahl. Aus verschiedenen Gründen eignet sich vor allem die Plattform Arduino [3, 4]. Im Folgenden steht dabei die Elektronik, die nötig ist um die μC in der Stratosphäre betreiben zu können, im Vordergrund. Dazu gehört die Heizungssteuerung, das Batteriemangement und die verwendete Messelektronik.

3.2.1 Konzeption der Heizung

Das Ziel der Heizung ist es bestimmte wärmeempfindliche Bauteile wie den Akku oder den Arduino vor direkter Kälteeinwirkung regelbar zu schützen sowie die Durchschnittstemperatur in der gesamten Box möglichst konstant zu halten. Dazu werden elektronisch ansteuerbare Heizelemente benötigt, die sich nah an den thermoempfindlichen Bauteilen wie Akku und Arduino platzieren lassen. Hierfür eignen sich klebbare Heizfolien [13]. Auf diesen befindet sich eine Metallbeschichtung, die sich bei Stromdurchfluss erwärmt. Mit einer Leistung von 3 Watt pro Stück können sie einen relevanten Einfluss auf die Innentemperatur nehmen. Die maximale Oberflächentemperatur von 323,15 K ist ungefährlich für die Elektronik. Zum Schutz der Messtechnik sowie der Leistungselektronik werden insgesamt drei Folien verwendet, die sich an der Innenseite der Holzbox befinden. Um das Problem der Überhitzung zu vermeiden wird eine Mehrpunktsteuerung über den Arduino verwendet. Prinzipiell muss hierzu die Steuerspannung mit der Versorgungsspannung logisch verschalten werden. Dazu eignen sich sogenannte Metall-Oxid-Feldeffekt-Transistoren. Vom Anwendungsbereich ähneln diese Relais-Schaltern, beruhen jedoch auf der Funktionsweise von Halbleitern. Die Anschlüsse *gate*, *drain* und *source* werden mit dem Arduino, der Folie und der 12 Volt Spannungsquelle verschalten. Die verwendeten pnp-MOSFETs stellen Kontakt zwischen drain und source her, wenn auf dem gate 5 Volt anliegen. Abbildung 2 zeigt den zugehörigen Schaltplan. So kann die Heizleistung vom Arduino temperaturabhängig gesteuert werden. Da für

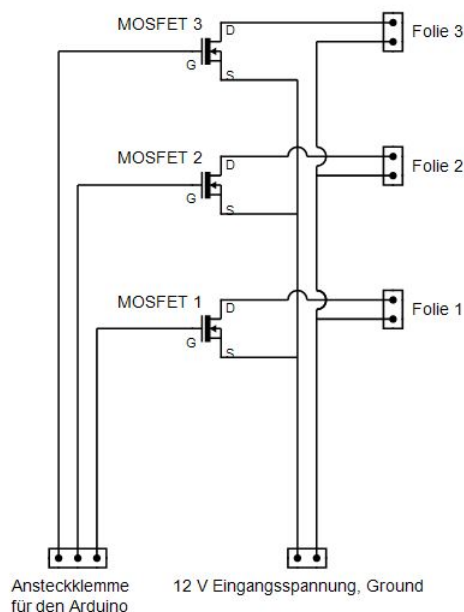


Abbildung 2: Schaltplan der Heizungssteuerung

jedes Heizelement ein Steuerelement verwendet wird, liegt eine Vierpunktregelung vor. Die Regelgrenzen liegen von 283,15 K bis 288,15 K im 5 K Abstand. Dabei wird die Aussentemperatur als Referenzwert verwendet.

3.2.2 Batteriemanagement

Durch den Einbau der Heizung steigt der "Energieverbrauch" der Sonde auf ein Vielfaches an. Es sollte möglich sein, die Sonde über die Dauer des gesamten Fluges heizen zu können. Bei einer Gesamtleistung von 9 W bei 12 V fließen 0,75 A. Da ein Flug bis zu 3 Stunden dauern kann [17], muss der Akku nur für die Regelung der Innentemperatur eine maximale Ladung von mindestens 2250 mAh zulassen. Ein konventioneller 9V-Block, wie er zu Beginn unseres Projekts verwendet wurde, hat im Durchschnitt eine Ladung von 200 mAh [2]. Ohne den "Energieverbrauch" der Messtechnik zu beachten, fordert dies die Parallelschaltung von 12 dieser Batterien. Aufgrund des Gewichts von 45 Gramm pro Stück und einem daraus folgenden Gesamtgewicht von 540 Gramm, ist diese Lösung problematisch. Außerdem muss eine derartige Stromversorgung vor jedem Flug neu aufgebaut werden, da 9 V-Blöcke in der Regel nicht aufladbar sind. Dies ist teuer und umweltschädlich. Aus diesen Gründen sollte ein Akku mit hoher maximaler Ladung und einer Ausgangsspannung von 3,3 V bis 12 V verwendet werden. Ähnliche Anforderungen an Stromquellen werden im Modellbau gestellt. Letztendlich wurde ein zweizelliger Lithium-Polymer-Modellbauakku der Firma Conrad Energy mit 3000 mAh bei 7,4 V Ausgangsspannung

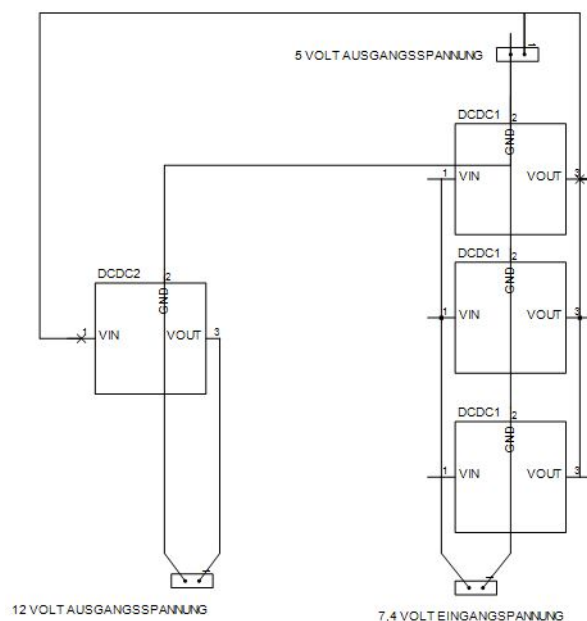


Abbildung 3: Schaltplan der Batteriemanagementschaltung

verwendet [13]. Der "Energieverbrauch" der Messeinheit liegt nach Herstellerangaben im Bereich von 10^{-3} A, weshalb dieser bei der Abschätzung vernachlässigt wurde [15]. Da die Heizung und der Arduino unterschiedliche Betriebsspannungen besitzen, werden diese jeweils angepasst. Der Zentralrechner Arduino Mega [14] wird mit einer Gleichspannung von 5 V betrieben, welche durch vorgeschaltene DC/DC-Wandler reguliert wird. Aufgrund der geringen Verlustleistung unter 10 % sind diese eine energieeffiziente Lösung. Abbildung 3 zeigt den zugehörigen Schaltplanausschnitt.

Da die Wandler, die die Spannung zu Beginn von 7,4 auf 5 Volt senken, nur 5 Watt [12] leisten, müssen drei Stück parallel geschaltet werden, um die nötige Leistung gewährleisten zu können. Verwendet wurde der R-785.0-1.0 der Firma RECOM [12]. Hierbei handelt es sich um sogenannte Resonanzwandler. Da hier auf Bauteile mit hohen Verlustleistungen verzichtet wird, kann ein Wirkungsgrad von 94 % bis 98 % erreicht werden [12]. Daran schließt die Stromversorgung der Messeinheit an, welche über Leiterplattenansteckklammern mit der Platine verbunden ist. Die für die Heizfolien benötigten 12 Volt werden durch einen in Reihe geschalteten KEIC X-0512 Wandler mit einer Leistung von 20 Watt bereitgestellt.

In einem Testlauf im Gefrierfach konnten die Bedingungen in der Stratosphäre simuliert werden. Alle "Stromverbraucher" wurden dauerhaft betrieben, um die Akkulaufzeit zu bestimmen. Die Box lag dort eine Nacht bei einer durchschnittlichen Umgebungstemperatur von 250,15 K. Über Messdauer von etwas mehr als 11 Stunden zeichnete die Messelektronik insgesamt 100719 Mess-

sätze bei einem Messintervall von 4 Zehntelsekunden auf. Während des Fluges am 22.08.2016 konnten in 10,62 h bei unterschiedlichen Messintervallen knapp 100000 Messungen durchgeführt werden. Dies entspricht einer durchschnittlichen Leistung von:

$$P = U \cdot I = U \cdot \frac{\Delta Q}{\Delta t} = 7,4 \cdot \frac{3000 \cdot 10^{-3} \cdot 3600 \text{As}}{38268 \text{s}} = 2,1 \text{W} \quad (20)$$

Wie sich so heraus gestellt hat, ist die Akkuleistung ausreichend. So können Ladungsabfälle aufgrund der Temperatur kompensiert werden.

3.3 Messelektronik

Im Fokus des Systems Sensorik - Arduino - Speichereinheit steht vor allem die Sicherung gegenüber äußeren Einflüssen wie Beschleunigungen, zu hoher Luftfeuchtigkeit oder Temperaturschwankungen. Letzteres wurde durch den Einbau der Heizfolien sichergestellt. Die Hardware ist für die Verwendung bei der Durchschnittsluftfeuchtigkeit von $\varphi = 17,5\%$ auf der Erdoberfläche ausgelegt. Über der Wolkendecke nimmt die relative Luftfeuchte ab. Die Wolken selbst werden in einem sehr kurzen Zeitraum durchbrochen, sodass diese sich ebenfalls als unproblematisch herausgestellt haben. Von großer Bedeutung ist die sichere Verlegung der Datenleitungen sowie die Fertigung einer widerstandsarmen Platine für die einzelnen Sensoren zur Resistenz gegenüber Beschleunigungen. Zur Übertragung werden einfache Überbrückungskabel mit PIN-Ausgängen verwendet, die zu Kabelzügen verbunden wurden. Die Sensoren selbst sind auf einer zentralen

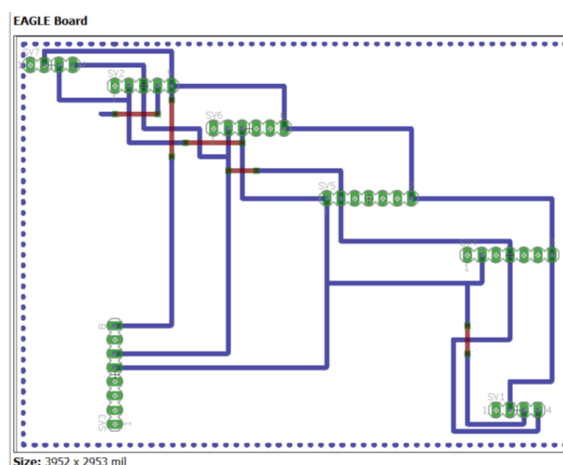


Abbildung 4: Die Graphik zeigt das Platinenlayout. Die durchgezogenen blauen Linien markieren die Leiterbahnen. Diese sind von einem Polygon, welches auf Gerätemasse liegt, umgeben.

Platine außerhalb der Box in Stiftleisten befestigt. Mittels dem Computerprogramm CadSoft EAGLE 5.0 [20] entworfene Platinenlayout wurde auf eine kupferbeschichtete Duroplastplatte übertragen. Die hierfür nötige Vorlage ist auf Abbildung 4 zu sehen. Nach der optischen Behandlung der kupferbeschichteten Seite der Leiterplatte konnten die Leiterbahnen durch Salz- und Säurelösungen freigeätzt werden. Auf der Platine befinden sich allerdings nur die digitalen Sensoren, deren für das I²C Protokoll nötigen Schnittstellen und Spannungsversorgungen zusammengefasst sind [4]. Gemessen wurden mit dem Bosch BMP280 Luftdruck, -feuchtigkeit sowie Temperatur [6], mit dem Kompassmodul HCM55883L die Magnetfeldstärke in drei Raumrichtungen [9], mit dem Beschleunigungssensor MPU-6050 die Beschleunigungen und Winkelbeschleunigungen in drei Raumrichtungen [7] und mit dem Lichtsensor SI-1142 die Intensität des sichtbaren Lichts [8]. Da über das BUS-Protokoll bis zu 127 [4] Sensoren verwendet werden können, wurde ein Ausgang zur Verbindung mit weiteren Platinen integriert. Die analogen Sensoren MQ135 [21] und MQ131 [22], die die CO₂- und O₃-Konzentration messen, wurden jeweils einzeln mit dem Arduino verbunden. Die SD-Shields [23] wurden direkt neben den μ C platziert, sodass möglichst kurze Verbindungsleitungen verwendet werden konnten. Das GPS- und GPRS-fähige Adafruit FONA 808 [24] zur Speicherung und telefonischen Übertragung der Koordinaten befindet sich als Aufsteckplatine auf einem separaten Arduino UNO [25].

4 Ergebnis

Der erste Freiflug fand im August 2016 statt. Der Ballon hob in 91619 Oberzenn ab und landete 2 Stunden später nahe dem knapp 100 km entfernten 86698 Oberndorf am Lech. Im Folgenden sollen die Messergebnisse dieses Fluges mittels der aus Kapitel 2 bekannten Grundlagen analysiert werden.

4.1 Die Höhenkurve

Mittels der in 2.2 angeführten Rechnung wurden die Druckwerte unter Berücksichtigung der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit in eine Höhenangabe umgerechnet. Abbildung 5 zeigt den zugehörigen Graphen. Der Zeitpunkt zu dem der Ballon platzt liegt bei 76 Minuten nach Aufzeichnungsbeginn und ist eindeutig an einem Knick zu erkennen. Die Höhenkurve verläuft stetig, jedoch nicht linear differenzierbar. Folglich lässt sich auch die Luftdichte über die Höhe auftragen. Dieser Zusammenhang ist auf Abbildung 6 zu sehen.

Bei genauerer Betrachtung lassen sich in der Höhenkurve Tendenzen in der Aufstiegs geschwindigkeit erkennen. Bis zur Hälfte des Aufstiegs deutet sich ein exponentieller, dann ein logarithmischer Verlauf an. Die durch Bildung der Differenzenquotienten entstandene Aufstiegs geschwindigkeit verdeutlicht diesen Verlauf. Abbildung 7 zeigt diesen.

Die Aufstiegs geschwindigkeit resultiert aus den auf den Ballon wirkenden Kräften. Dabei wirkt die Auftriebskraft nach oben, während die Luftreibung und die Gravitation zur Erde wirken. Um die Auftriebskraft sowie die Luftreibung bestimmen zu können wird das Volumen der Kugel benötigt. Die Vergrößerung ist wiederum auf die Veränderung des Drucks im und außerhalb des Ballons zurückzuführen. Da über die Füllmenge das Anfangsvolumen bekannt ist, reicht es das Verhältnis

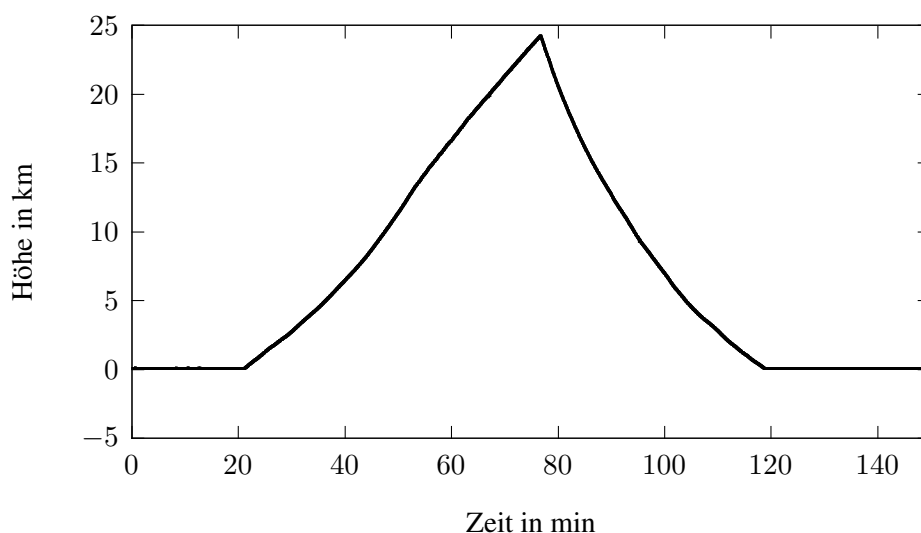


Abbildung 5: Höhenkurve

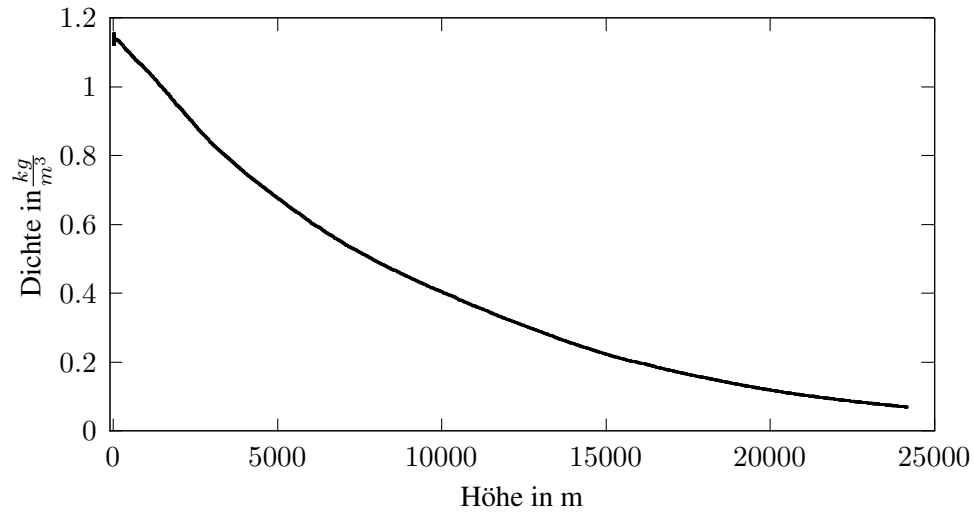


Abbildung 6: Luftdichte in Abhängigkeit der errechneten Höhe

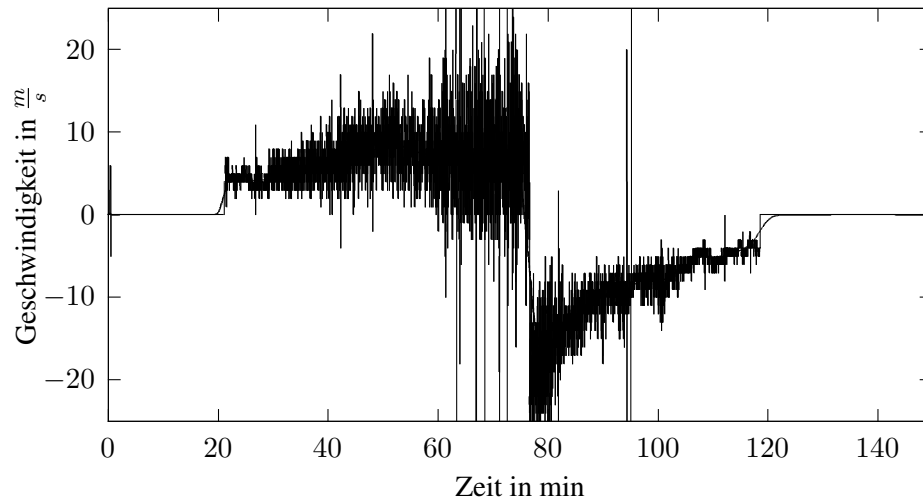


Abbildung 7: Aufstiegsgeschwindigkeit

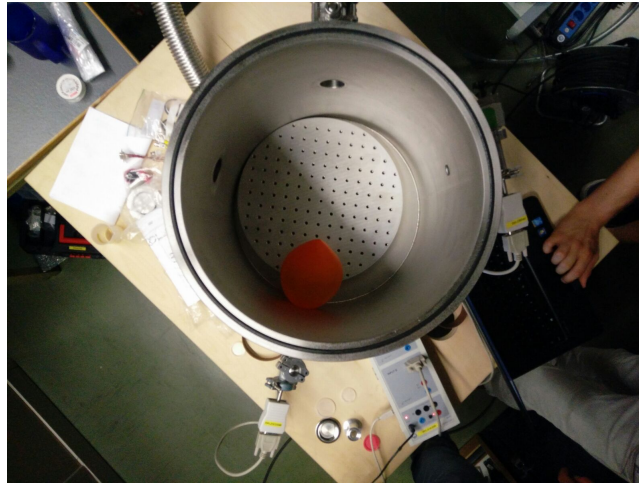


Abbildung 8: Versuchsaufbau zum Messen der Druckentwicklung im Ballon

zwischen Innen- und Aussendruck als materialspezifische Größe zu kennen. Diese wurde experimentell bestimmt. Abbildung 8 zeigt den Versuchsaufbau. Der Luftballon, der aus dem zu untersuchenden Material besteht, wurde in der Vakuumpumpe gefüllt. Der Druck im Ballon, sowie innerhalb der Kammer wurde über Sensorik aufgezeichnet und anschließend über CASSY-Lab ausgewertet. Abbildung 9 zeigt den Innendruck in Abhängigkeit vom Aussendruck. Mittels der Software gnuplot [26] wurde die Funktion $p_{\text{Innen}}(p_{\text{Aussen}}) = \frac{11088}{p_{\text{Aussen}} + 167} + 1,03p_{\text{Aussen}} + 0,07$ nach dieser Kurve gefittet. Der momentane Zusammenhang:

$$\frac{p_{\text{Luftballon}}}{p_{\text{Vakuumpumpe}}} = \frac{p_{\text{Wetterballon}}}{p_{\text{Atmosphäre}}} \quad (21)$$

liefert mit der Konstruktion von $p_{\text{Innen}}(p_{\text{Aussen}})$:

$$p_{\text{Wetterballon}} = p_{\text{Innen}}(p_{\text{Atmosphäre}}) \quad (22)$$

Über Umformung der Zustandsgleichung für ideale Gase [1] lässt sich das Volumen des Ballons bestimmen:

$$V = \frac{mR_f T}{p} \quad (23)$$

Die Masse lässt sich über das bekannte Startvolumen auf 0,56 kg bestimmen. Das Volumen ist

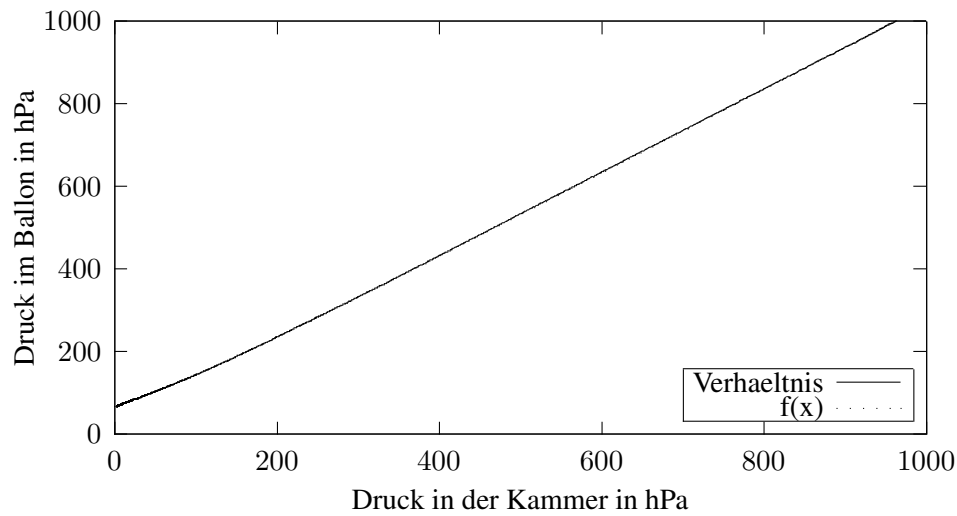


Abbildung 9: Druck im Ballon in Abhängigkeit von Kammerdruck

zentral, um den Kräftezustand während der Flugphase zu beschreiben. Die Kraft, die den Ballon letztlich zum Steigen bringt, ist die Auftriebskraft [1]:

$$F_A = g\rho V \quad (24)$$

Lässt man die gewonnenen Werte mit einfließen, ergibt sich Abbildung 10. Entgegengesetzt dieser Kraft wirkt die Gravitation $F_G = mg$ und die Luftreibung. Diese lässt sich unter Zuhilfenahme des Querschnitts und der Aufstiegs geschwindigkeit ausdrücken durch [27]:

$$F_R = \frac{1}{2}c_w A \rho v^2 \quad (25)$$

Das Kräftegleichgewicht ergibt sich durch:

$$F_{\text{resultierend}} = F_A - F_R - F_G \quad (26)$$

Abbildung 11 zeigt die Ergebnisse in Bezug auf die Aufstiegsphase und bestätigt die Vermutungen.

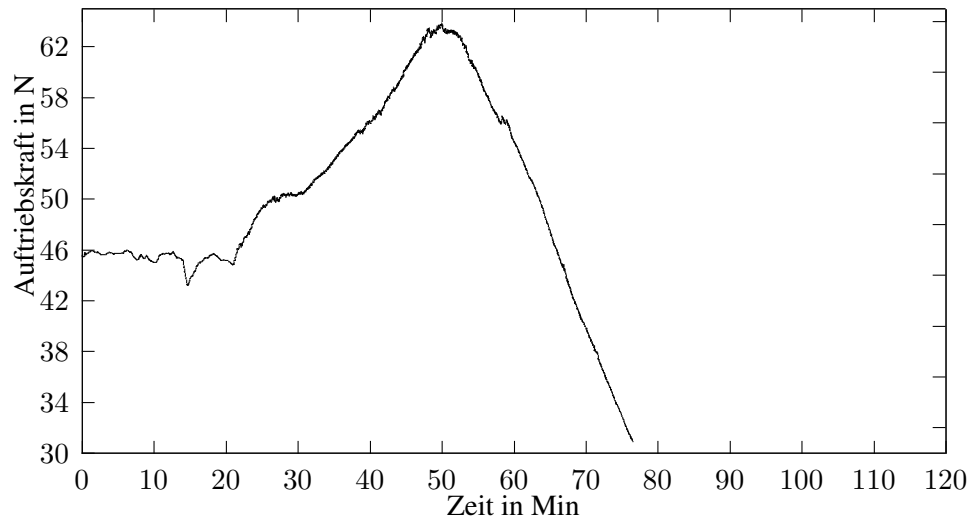


Abbildung 10: Zeitlicher Verlauf der Auftriebskraft

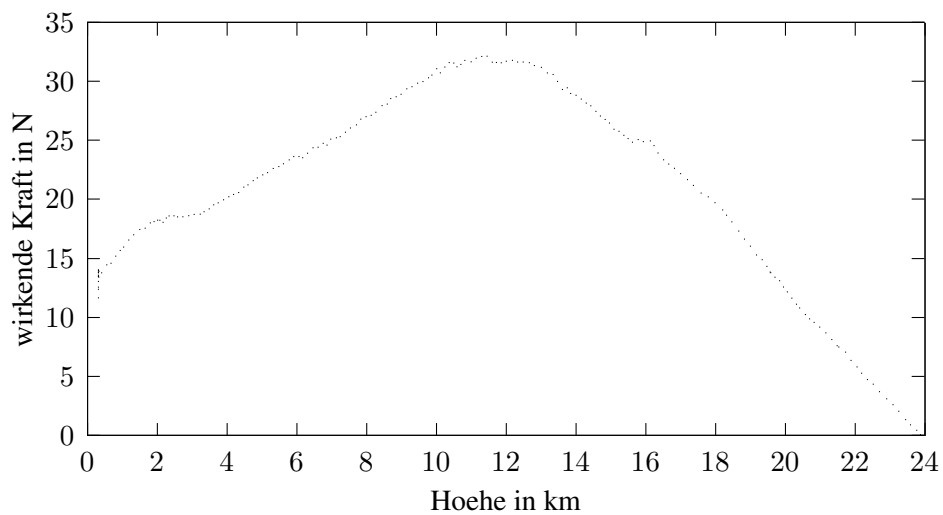


Abbildung 11: Resultierende Kraft in Abhängigkeit der errechneten Höhe

4.2 Analyse der Luftfeuchtigkeit

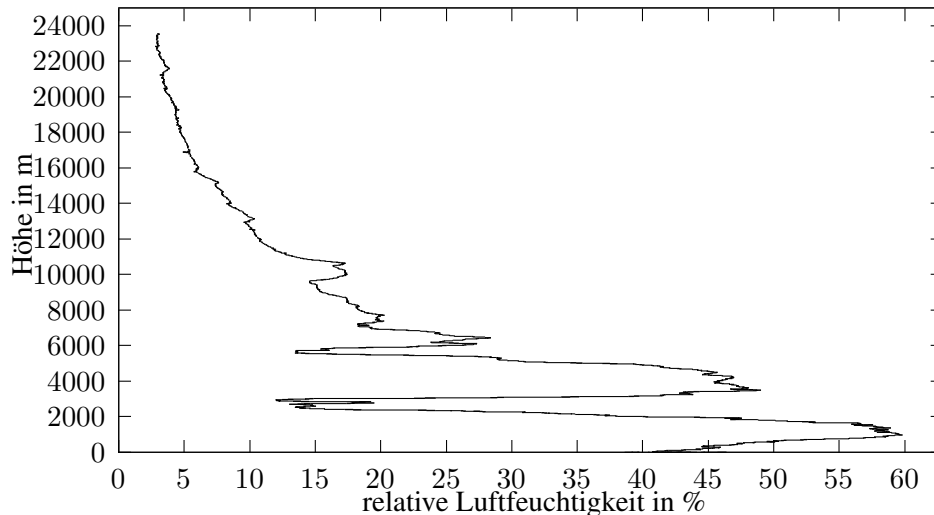


Abbildung 12: relative Luftfeuchtigkeit in Abhängigkeit der errechneten Höhe

Auf Abbildung 12 ist der Höhenquerschnitt der relativen Luftfeuchtigkeit abgebildet. Der Graph weist im Bereich bis 8 km einen markanten Verlauf auf. So sind zwei deutliche Ausschläge mit zunächst schlagartigem Anstieg der Luftfeuchte bis zu 60 % bis 50 % und ebenso schnellem Absinken auf 11 % bis 14 % zu erkennen. Eine dritte Erhöhung zeigt sich zwischen 7 und 12 km. Dieser fällt mit einer Differenz von 17 % bis 12 % deutlich kleiner aus, als die beiden Vorhergegangenen. Ab 12 km Höhe nimmt die Luftfeuchte leicht exponentiell von 10 % bis auf den insgesamt niedrigsten Wert von 2 % am höchsten Punkt des Fluges ab. Die drei Peaks lassen sich anhand der Wolkenschichten erklären [1]. Die unterste wird als Strato bezeichnet und besitzt eine vertikale Ausdehnung vom Erdboden bis auf 2 km Höhe. Die mittlere Alto reicht bis auf 5 km und die Obere Cirro bis auf 12 km. Sobald die Sonde eine Schicht vertikal durchquert, erhöht sich die Feuchtigkeit der Luft rapide. Zu sehen ist, dass die beiden Eigenschaften der vertikalen Ausdehnung und des Wassergehaltes der Wolkenschichten mit der Höhe an Ausprägung verlieren.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Ergebnisse unseres Projekts bisher einen grundlegenden Einblick in atmosphärische Klimaforschung geben. Allerdings wurde das Potential derartiger Stratosphärenflüge bei Weitem noch nicht ausgenutzt. Die Messdaten an sich beinhalten noch keine neuen Erkenntnisse. Aus diesem Grund soll es bei der nächsten Erweiterung, wenn auch in geringem Maße, darum gehen Neuland zu betreten. Durch die Unterstützung des Erlanger-Schüler-Forschungs-Zentrums bietet sich eine Ausrichtung in Richtung Astroteilchenphysik an. Dennoch ist die Messtechnik wie bisher auch an Größe und Gewicht limitiert. Ein Messinstrument, welches diesen Anforderungen entspricht und sich zusätzlich mit der bisherigen Technik verbinden lässt, sind Siliziumphotomultiplier (SiPM). Auf Basis von Halbleiterstrukturen kann so ionisierende Strahlung in großer Höhe auf neue Weise registriert werden [5]. Da die SiPM aufgrund ihrer Genauigkeit auch sehr stark rauschen, soll eine elektrische Schaltung gebaut werden, die eindeutige Events filtern kann. Dies soll wiederum mit einem Microcontroller geschehen. Sollte diese Vorgehensweise sich als nicht praktikabel herausstellen sind auf jeden Fall weitere Freiflüge notwendig, um die Aussagen verifizieren und dynamische Aussagen ermöglichen zu können.

6 Danksagung

Das Projekt wäre in seiner beschriebenen Form ohne die großartige Unterstützung nicht möglich gewesen. Eine besonderer Dank gilt hierbei dem Erlanger-Schüler-Forschungs-Zentrum, allen voran Stefan Berger und Patrick Hufschmidt. Der Großteil unserer Projektarbeit fand innerhalb der fünf Forschungswochen statt und brachte uns jedes Mal aufgründ der herausragenden finanziellen und inhaltlichen Unterstützung weiter.

Dank gilt auch der Gemeinde 91619 Oberzenn und dem Luftfahrtamt Bayern für die Genehmigung des Fluges [Anhang].

Eine sehr zentrale Unterstützung für die Durchführung des Freiflugs stellte die finanzielle Unterstützung durch den Jugend-forscht Sponsorpool Bayern dar. Die Mittel wurden für den Ballon, den Fallschirm und den Tracker verwendet, wodurch die zeitnahe Durchführung letztendlich erst möglich wurde. Weitere finanzielle Unterstützung stellte die Firma WP-Engineering GmbH zur Verfügung.

Der eigentliche Initiator unseres Projekt und der größte Unterstützer von Seiten der Schule ist unser offizieller Projektbetreuer Dr. Stefan Bärthlein. Mit stetig neuen Ideen und Informationen war er ein zentraler Faktor während der Entwicklung des Projekts.

Literatur

- [1] Walter Roedel, Thomas Wagner: *Physik unserer Umwelt: Die Atmosphäre*, 4. Auflage, Springer Verlag, Heidelberg 1991
- [2] Jean Mascart: *L'étude de la haute atmosphère et les travaux de Léon Teisserenc de Bort*, 1. Auflage, La Nature, 1931
- [3] Jeremy Blum: *Exploring Arduino*, 1. Auflage, John Wiley and Son, 2013
- [4] Simon Stadlinger: *Klimadatenerfassung mittels der Microcontrollerplattform Arduino*, Bad Windsheim 2016
- [5] Judith Schneider: *Charakterisierung von Siliziumphotomultipliern*, Erlangen 2015
- [6] Bosch Sensortec GmbH: *Bosch BME280 - Combined humidity and pressure sensor*, Reutlingen 2015.
- [7] Silicon Laboratories Inc.: *Proximity/UV/Ambient Light Sensor IC with I2 Interface*
- [8] InvenSense Inc.: *MPU-6050 Produkt Specification*, Sunnyvale 2013
- [9] Honeywell: *3-Axis Digital Compass IC HMC5883L*, Plymouth 2013
- [10] *Aussenstarts mit Freiballonen*, Luftfahrtamt Nordbayern, Nürnberg 2016
- [11] <https://www.uni-marburg.de/fb02/bwl09/pdfdatei/lehre/folienteil4>, aufgerufen am 15.09.2016
- [12] <https://www.conrad.de/de/dcdc-wandler-print-recom-r-7850-10-5-vdc-1-a-5-w-anzahl-ausgaenge-1-x-154496.html?sc.queryFromSuggest=true>, aufgerufen am 18.09.2016
- [13] <https://www.conrad.de/de/heizfolie-selbstklebend-12-vdc-12-vac-3-w-schutzart-ipx4-l-x-b-60-mm-x-47-mm-thermo-189204.html>, aufgerufen am 17.10.2016
- [14] <https://www.conrad.de/de/modellbau-akkupack-lipo-74-v-3000-mah-20-c-conrad-energy-stick-hardcase-tamiya-stecker-209139.html>, aufgerufen am 17.10.2016
- [15] <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>, aufgerufen am 19.10.2016
- [16] <http://www.chemie.de/lexikonWC3A4rmeleitfC3A4higkeit.html>, aufgerufen am 24.10.2016

- [17] <https://www.stratoflights.com/tutorial/wetterballon-tutorial/>,
aufgerufen am 24.10.2016
- [18] <https://de.wikipedia.org/wiki/Luftdichte>,
aufgerufen am 24.10.2016
- [19] <https://www.blender.org/>,
aufgerufen am 04.11.2016
- [20] <https://cadsoft.io/>,
aufgerufen am 05.11.2016
- [21] <https://www.olimex.com/Products/Components/Sensors/SNS-MQ135/resources/SNS-MQ135.pdf>,
aufgerufen am 05.11.2016
- [22] <http://www.sensorsportal.com/DOWNLOADS/MQ131.pdf>,
aufgerufen am 05.11.2016
- [23] http://www.miniinthebox.com/de/sd-card-reading-writing-modul-fuer-arduino_p421823.html?prm=2.5.1.1,
aufgerufen am 06.11.2016
- [24] <https://www.adafruit.com/products/2636>,
aufgerufen am 06.11.2016
- [25] <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>,
aufgerufen am 06.11.2016
- [26] <http://gnuplot.sourceforge.net/>,
aufgerufen am 07.11.2016
- [27] <http://www.leifiphysik.de/mechanik/freier-fall-senkrechter-wurf/ausblick/fallschirmsprung-mit-luftreibung>,
aufgerufen am 07.11.2016

7 Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die Seminararbeit ohne fremde Hilfe angefertigt und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.