

Stratoballon

Eine Facharbeit zum ersten Stratosphärenballonflug

am Carl-Fuhlrott-Gymnasium

von Benjamin Frost und Hendrik Tackenberg

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis

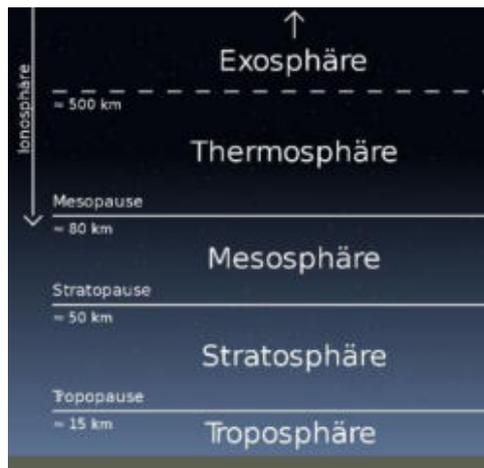
Prolog	2
Vorwort.....	2
Unsere Motivation.....	3
Beschreibung des Projekts	4
Vorbereitung und Zusammenbau	5
Grundlegender Aufbau.....	5
Wahl der Komponenten	5
Schaltskizzen.....	12
Programmierung.....	13
Sondenaufbau	15
Rechtliches.....	16
Start des Stratosphärenballons	19
Erster Startversuch	19
Zweiter Startversuch	20
Auswertung der Daten	23
Flugroute	23
Wetterdaten.....	24
Kameras	30
Epilog	31
Erfahrungsbericht.....	31
Abschließende Worte zum Projekt	31
Danksagung	33
Eigenständigkeitserklärung	34
Abbildungsverzeichnis	35

Prolog

Vorwort

Ab dem Jahr 1896 führte ein französischer Meteorologe namens Léon-Philippe Teisserenc de Bort die ersten Experimente mit Hilfe von unbemannten Ballons durch, die bis in die Stratosphäre anstiegen. Mit Hilfe dieser Ballons war Teisserenc de Bort in der Lage die kontinuierliche Abnahme der Temperatur durch Höhe nachzuweisen. In den darauffolgenden Jahren erforschte und entdeckte der französische Meteorologe, dass im Bereich von 10 bis 16 Kilometern die Temperatur nicht mehr absinkt, sondern eine Temperaturkonstanz aufweist. Dieser Bereich ist heute als „Tropopause“ bekannt. Mit Hilfe dieser Beobachtungen ließ sich eindeutig bestimmen, dass es eine weitere Atmosphärenschicht geben muss.

Bereits im Jahr 1902 und über 200 Flüge später veröffentlichte er gemeinsam mit dem deutschen Meteorologen Richard Adolph Aßmann eine Arbeit, in der er diese beiden Atmosphärenschichten als Troposphäre und Stratosphäre betitelte. Diese Namenskonvention hat bis heute Bestand. In der Arbeit erklärten die Meteorologen des Weiteren, dass es sich bei diesen beiden Atmosphärenschichten um die einzigen Schichten der Erdatmosphären handele. Die Ungültigkeit dieser Aussage konnte bis heute nachgewiesen werden. Jedoch muss man an dieser Stelle anmerken, dass die darauffolgenden Schichten der Erdatmosphäre erst bei ca. 50 Kilometern beginnen und somit weit außerhalb der Reichweite der Ballons waren. Teisserenc de Bort hat bis zu seinem Tod im Jahr 1913 weiter geforscht und vermachte sein Erbe an das Observatorium des französischen Staats, so dass seine Forschungsarbeiten fortgesetzt werden konnten.



Nach heutiger Erkenntnis wird die Erdatmosphäre in fünf Schichten aufgeteilt. Diese sind die Troposphäre, Stratosphäre, Mesosphäre, Thermosphäre und Exosphäre.

Die Abbildung Abb. 1 soll dies verdeutlichen.

Abbildung 1, Schematische Darstellung der Erdatmosphäre.

Unsere Motivation

Zahlreiche Unternehmen und Privatpersonen haben bereits einen Stratosphärenballon gestartet, sei es zu Marketingzwecken oder zur Erfassung von wetterspezifischen Messdaten. Ein solcher Flug ist nicht nur durch Massenproduktion der Einzelprodukte, sondern auch durch zahlreiche Anbieter von Einzelkomponenten für Privatpersonen bezahlbar wie auch umsetzbar geworden. Eine wichtige Rolle in Deutschland spielt dabei das Unternehmen „Stratoflights“, das sowohl einen Shop anbietet um Produkte rund um den Flug zu erhalten, als auch einige nützliche Tutorials und Tools, die Vorbereitungen und Flug des Stratosphärenballons erleichtern.

Wir sind eher zufällig auf dieses Projekt gestoßen, denn unser Informatiklehrer Herr Daniels hat uns im Unterricht angesprochen, ob wir Interesse hätten einen solchen Stratosphärenflug durchzuführen. Da wir uns beide für den naturwissenschaftlichen Unterricht, besonders Informatik, Mathematik und Physik, interessieren, waren wir von dieser Idee begeistert.

Da wir beide in der Qualifikationsphase zum Abitur sind, hatten wir zusätzlich die Möglichkeit dieses Projekt als Lernleistung fürs Abitur einzureichen. Das bedeutet, dass wir freiwillig eine 5. Abiturprüfung ablegen, in der wir das Projekt vorstellen.

Beschreibung des Projekts

Die grundlegende Idee des Projekts ist es eine Sonde, die mit einigen selbst ausgewählten und programmierten Sensoren ausgestattet ist, mit Hilfe eines Ballons in die Stratosphäre zu schicken. Für die Lernleistung angemeldet war lediglich eine Grundlage zu schaffen, sodass in den nächsten Jahren Schüler auf unser Projekt aufbauen können und mit Hilfe unserer Vorarbeit einen weiteren Start ggf. mit mehr Sensoren durchführen können. Da ein solcher Flug allerdings höchst interessant ist und diese Gelegenheit für uns eine einmalige Chance darstellte, haben wir uns dazu entschieden über die Grundlage hinauszugehen und unsere Sonde gleich mit zahlreichen Sensoren und Kameras zu bestücken.

Wir haben jedoch nicht vernachlässigt, dass die grundlegende Aufgabe war einen Flug durchzuführen, erfolgreich zu orten und schließlich eine Anleitung zu schreiben, mit der man unseren Flug reproduzieren kann. Innerhalb dieser Arbeit möchten wir auf Vorbereitung und Zusammenbau, den Ballonstart und die Auswertung der Daten eingehen.

Vorbereitung und Zusammenbau

Grundlegender Aufbau

Der grundlegende Aufbau unseres Wetterballons bestand aus mehreren Komponenten. An dem Naturkautschuk-Latex-Ballon ist mit einem Abstand von drei Metern der Fallschirm befestigt. Zwei weitere, jeweils zwölf Meter lange Schnüre werden durch jeweils zwei Löcher im Deckel geführt, sodass beide Enden zurück zum Fallschirm führen. Also führen vier Verbindungen mit einer Länge von 6 Metern von der Sonde zum Fallschirm.

Es ist vorteilhaft die Verbindung zwischen Fallschirm und Sonde länger zu wählen, um die Chancen zu erhöhen, diese aus einem Baum bergen zu können, jedoch sollte das Gespann nicht zu lang werden, um den Start zu vereinfachen.

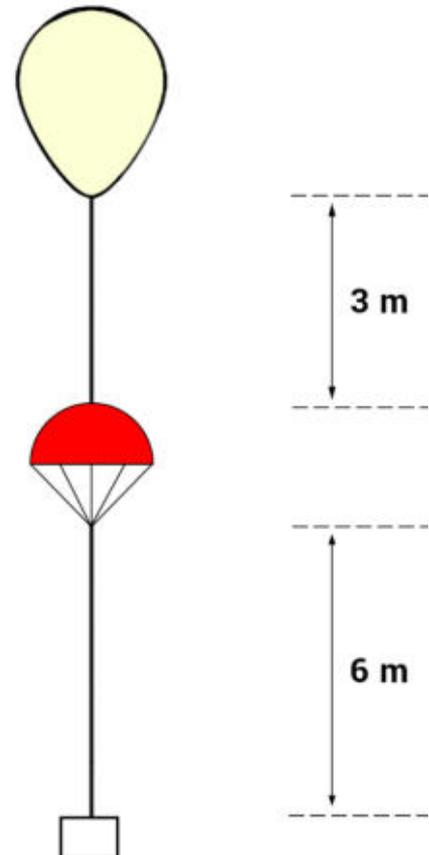


Abbildung 2, Skizze des grundlegenden Aufbaus.

Wahl der Komponenten

Kameras

Um die besonderen Perspektiven aus der Stratosphäre und der Reise des Ballons festzuhalten, haben wir uns entschieden den Flug mit Kameras zu dokumentieren. Wir haben dafür drei Raspberry Pi Zeros mit Kamera-Modulen benutzt. Bei den Raspberry Pi Zeros handelt es sich um Einplatinencomputer, welche mit einem Linux-Betriebssystem laufen.



Abbildung 3, Raspberry Pi Zero mit angeschlossenem Kameramodul.

Die Kamera-Module haben in unserem Fall einen Weitwinkel von 120°, welcher einen größeren Bildausschnitt ermöglicht.

Wichtig für die optimale Aufzeichnung von Videos ist es, dass die SD-Karten eine möglichst hohe Schreibgeschwindigkeit haben, um alle Einzelbilder zu speichern. Empfohlen ist hier eine Schreibgeschwindigkeit von ca. 90-100 MB/s.

Wir haben uns dazu entschieden für eine Vogelperspektive eine Kamera nach unten und die beiden verbleibenden Kameras horizontal auszurichten. Diese beiden Kameras richteten wir in der Sonde gegenüber aus, um einen maximalen Bereich der Umgebung gleichzeitig erfassen zu können.

Wettersensor

Um Wetterdaten wie Luftdruck und Luftfeuchtigkeit messen zu können haben wir den BME680-Sensor ausgewählt. Dieser bietet zusätzlich noch einen Temperatur- sowie Gassensor, welcher den Widerstand, bedingt durch die Luftzusammensetzung, ausgibt.



Abbildung 4, BME680 Umweltsensor.

Der Sensor hat einen Funktionsbereich von -40°C bis 85°C und ist somit am ehesten für unsere Ansprüche geeignet. Die Temperaturdaten verlieren jedoch je extremer sie werden desto schneller an Genauigkeit. Der größte Nachteil ist jedoch, dass der Drucksensor nur mit einem Funktionsbereich von 1100 hPa bis minimal 300 hPa angegeben ist. Diese Grenze ist bereits ab ca. 9 km über N.N. unterschritten, jedoch gibt es keine geeignete Alternative mit einem breiteren Funktionsintervall.

Temperatursensor

Um sowohl die Temperatur innerhalb der Sonde, als auch die Temperatur außerhalb der Sonde zu messen, haben wir zwei DS18B20 Temperatursensoren verbaut, da diese einen Funktionsbereich von -55°C bis 125°C haben. Zwischen -10°C und 85°C erreicht dieser Sensor sogar eine Genauigkeit von $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Aus diesen Gründen ist der DS18B20 deutlich zuverlässiger für die Temperaturoaufzeichnung als der Temperatursensor des BME680.



Abbildung 5, DS18B20 Temperatursensor.

Halbleiterdetektor

Unser besonderer Wunsch war es die erhöhte Radioaktivität in der Stratosphäre, die so genannte Höhenstrahlung, zu erfassen. Hierfür benötigten wir einen Strahlendetektor, welcher zu unseren Minicomputern kompatibel und möglichst leicht bzw. klein ist. Aus diesen Gründen fiel unsere Wahl auf einen Halbleiterdetektor, den Pocket Geiger Radiation Sensor (Type 5). Dieser ist in der Lage β - und γ -Strahlung zu erfassen.



Abbildung 6, Halbleiterdetektor für radioaktive Strahlung.

GPS und SMS

Natürlich ist es für den Stratosphärenballon erforderlich, dass man diesen orten kann und die Flugroute sowie die erreichten Höhen auslesen kann. Hierfür haben wir das GPS Logger Shield zusammen mit einen FONIA 800 Shield verwendet. Dies ermöglicht uns, dass wir die aktuelle Position unserer Sonde über das FONIA Shield und die SIM-Karte als SMS-Nachricht mit einem Google-Maps Link, welcher die aktuelle Position beinhaltet, senden. Ebenfalls werden sämtliche GPS-Daten auf eine SD-Karte gespeichert. Die Besonderheit des Adafruit GPS Logger Shields ist, dass es sich hierbei um ein entsperres GPS-Modul handelt. Also ist es nicht wie normale GPS-Module auf eine Maximalhöhe von 18 km gesperrt, um militärische Verwendungen auszuschließen.

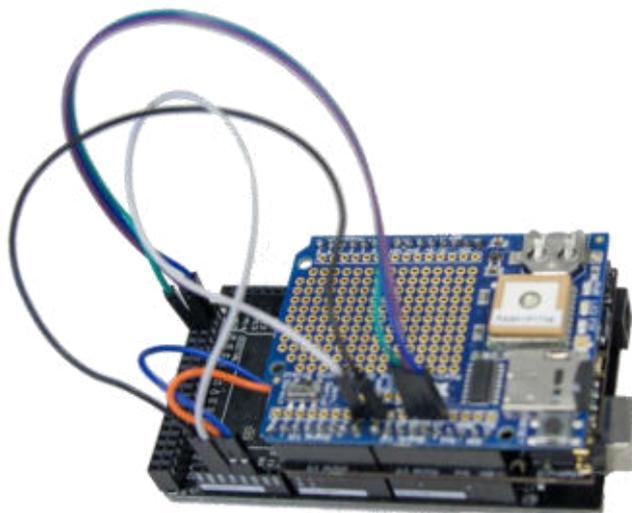


Abbildung 7, Arduino Mega 2560 mit GPS- und SMS-Modul.

Amateurfunk-Modul

Um zur Absicherung ein Zweitsystem zur Ortung der Sonde zu haben, verwendeten wir ebenfalls ein Amateurfunk-Modul, für welches jedoch eine Amateurfunklizenz notwendig ist, somit hat man ein eigenes Rufzeichen. Die gesendeten Signale des Moduls werden von verschiedenen Empfangsstationen (APS-iGates) empfangen und auf die Website „aprs.fi“ geladen. Von dieser Website können dann sämtliche Daten entnommen werden.

Das Modul sitzt auf einem Arduino Uno, der zur kompletten Absicherung und Minimierung des Risikos über eine eigene Stromversorgung mit eigenen Batterien verfügt.

Minicomputer

Als Basis für alle Sensoren haben wir zwei Arduino Mega 2560 gewählt und die Aufgaben auf diese sinnvoll verteilt:

Der erste Microcontroller, wie in Abb. 7 dargestellt, ist mit dem GPS- und dem GSM-Shield versehen. Dieser speichert sämtliche Daten des GPS und ist für das Senden der SMS zuständig.

Der zweite Microcontroller ist die Plattform für alle Sensoren, den BME680 Umgebungssensor, die beiden DS18B20 Temperatursensoren, sowie den Halbleiterdetektor für die Messung der Radioaktivität.

Die Vorteile der Arduino Mega 2560 sind, dass diese bessere Spezifikationen haben. Für solche Anwendungen ist besonders der Zwischenspeicher signifikant, welcher bei Entwicklungsboards zu gering wäre.

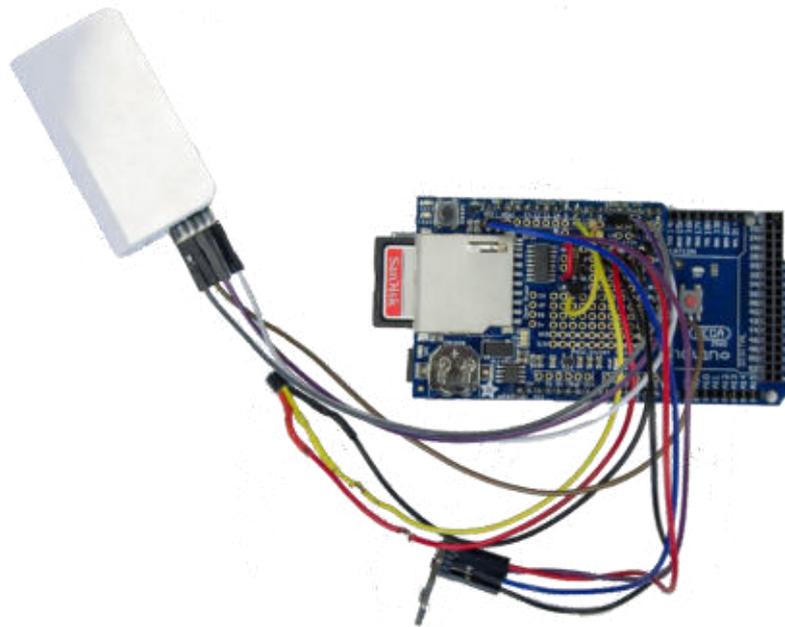


Abbildung 8, Arduino Mega 2560 mit Umwelt- und Temperatursensoren, sowie Halbleiterdetektor.

Stromversorgung

Die Stromversorgung des gesamten Messsystems gestaltete sich als sehr anspruchsvoll. Hierfür galt es einen bestmöglichen Kompromiss aus Kompatibilität, Flexibilität und Verlässlichkeit sowie einem Minimum an Platz und Gewicht zu finden. Wir haben uns aus diesem Grund für die Leistungsbatterien und ein entsprechendes Batterypack von Stratoflights entschieden, da sich diese auf ähnlichen Missionen bewährt haben. Um alle fünf Microcontroller mit Strom versorgen zu können, haben wir zusätzlich einen USB-Hub benötigt, um den Strom zu verteilen. Zu den Raspberry Pi Zeros führten handelsübliche Micro-USB-Kabel, zu den Arduino Mega 2560 führten USB-Type-B-Kabel.

Testen der Sensoren

Bevor wir alle Sensoren, Microcontroller und Kameras endgültig in der Box verbauen, wollten wir sichergehen, dass deren Funktionalität sichergestellt ist. Aus diesem Grund haben wir verschiedene Tests durchgeführt, um die Resultate qualitativ beurteilen zu können.

Zuerst testeten wir den Umweltsensor, explizit die Luftdruckmessung. Hierfür verglichen wir den Luftdruck, den wir auf dem Schulhof gemessen haben, mit dem, welcher auf dem Dach der Schule zu messen war. Mit Hilfe der barometrischen Höhenformel ermittelten wir so eine Höhendifferenz, welche für diesen verhältnismäßig geringen Höhenunterschied einen sehr realistischer Wert ergeben hat.

Ebenfalls wollten wir die Belastbarkeit der Sensoren bezüglich der erwarteten, geringen Temperaturen messen. Um dies zu testen, wurde der Microcontroller ohne weitere Isolierung für ca. 50 Minuten in die Tiefkühltruhe gelegt. Währenddessen sollten sämtliche Daten erfasst und gespeichert werden. Diesen Test überstand der Microcontroller ohne Ausfälle und zeichnete realistische Werte auf.

Um auch den Halbleiterdetektor zu prüfen, haben wir diesen mit radioaktiven Präparaten aus der Physik-Sammlung getestet. Hierbei stellte sich heraus, dass dieser nur eine geringere Aufnahmeintensität für radioaktive Gamma-Strahlung gegenüber einem Geiger-Müller-Zähler hat. Wir haben festgestellt, dass der Halbleiterdetektor hingegen sensibler für radioaktive Beta-Strahlung war, welche jedoch durch die Styroporwände bereits merklich geblockt werden würde.

Außerdem wollten wir sichergehen, dass die GPS/SMS-Funktion zuverlässig funktioniert und das GPS-Modul auch dafür ausreichend schnell eine Verbindung zu genügend Satelliten aufbaut. Hierfür haben wir den Microcontroller mit dem GPS- und dem SMS-Modul auf einer Autofahrt angeschaltet. Hierbei ist uns aufgefallen, dass das GPS während des Fahrens nur sehr schwer eine Verbindung zu Satelliten herstellen kann. Jedoch reichte die Standzeit einer Ampelphase um diese Verbindung herzustellen. Ab diesem Zeitpunkt lief das System selbst bei Geschwindigkeiten von über 60 Stundenkilometer präzise und kontinuierlich.

Sobald auf allen Microcontrollern die finalen Skripts hochgeladen waren, haben wir ebenfalls den Stromverbrauch, bzw. die maximale Laufzeit mit unseren Leistungsbatterien errechnet. Dies war mithilfe eines Stromstärkemessgerätes möglich, welches an das USB-Kabel angesteckt wurde. Damit haben wir Stromstärken von 0,5-0,8 Ampere gemessen. Zusammen mit der Batteriekapazität

von 2400 mAh ließ sich eine Laufzeit errechnen. Um einen Toleranzbereich zu haben, rechneten wir mit einer durchschnittlichen Stromstärke von 0,8 Ampere:

$$\frac{2400 \text{ mAh}}{0,8 \text{ A}} = 3,0 \text{ h}$$

Da die vorausberechnete Flugdauer bei ca. 2,6 Stunden lag, bedeutete dies, dass wir nur eine sehr geringe Überkapazität hatten. Folglich durften die Batterien während der Startvorbereitung erst spätmöglichst eingeschaltet werden.

Schaltskizzen

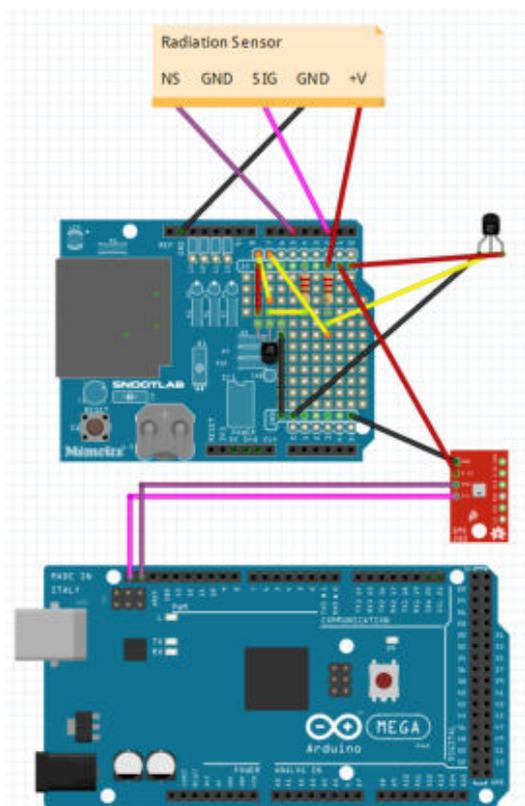


Abbildung 9, Fritzing des Aduino Mega 2560 mit den Sensoren und dem Halbleiterdetektor aut dem SD-Logging-Shield.

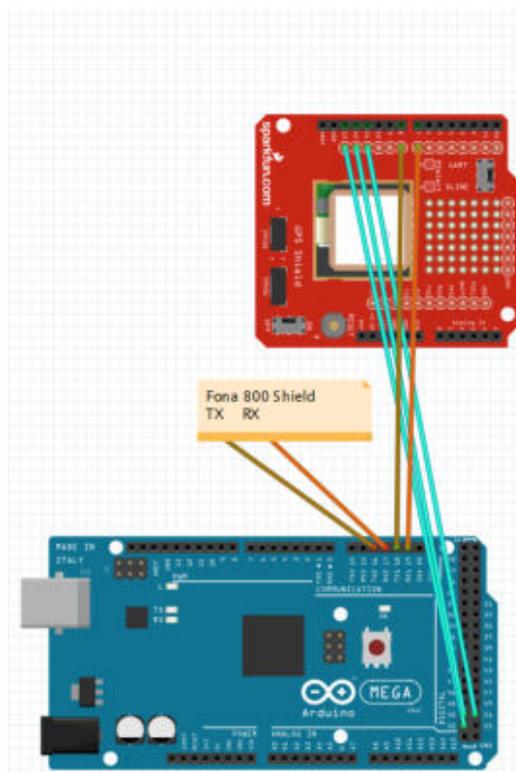


Abbildung 10, Fritzing des Arduino Mega 2560 mit dem Fona 800- und dem GPS-Logging-Shield.

Programmierung

Da wir uns für zwei verschiedene Plattformen, zum einen Arduinos und zum anderen Raspberry Pi Zeros, entschieden haben, lässt sich die Programmierung auch am besten anhand dieser aufteilen und erklären.

Arduinos

Die Programmierung von Arduinos geschieht mit der vom Hersteller angebotenen Entwicklungs-IDE, welche unter dem Namen „Arduino IDE“ veröffentlicht wird. Man kann hier auf C und C++ Basis einen Programmcode im Arduino IDE erstellen und diesen mit einem USB-Kabel direkt auf das verbundene Arduino-Board hochladen.

Da wir zwei Arduinos zur Verfügung hatten, war es für uns sinnvoll die Sensoren ebenfalls auf zwei Boards aufzuteilen. Auf den kleineren und auch leistungsschwächeren Arduino, nämlich den Arduino Uno, haben wir das GPS- und SMS-Modul verbaut, da für diese weniger Programmierbibliotheken benötigt werden, welche sehr viel Programmier- und Arbeitsspeicher belegen würden. Als wir jedoch in der späteren Entwicklungsphase dieses Boards eine SD-Karte verbaut haben und eine SD-Karten-Bibliothek importierten, haben wir die maximale Kapazität des Arbeitsspeichers mit 103% leicht überschritten, was verhinderte, dass unser Programm ausgeführt werden konnte. Die SD-Karten-Bibliothek muss einen Buffer von 512 Bytes reservieren, was einem Speicherblock auf einer SD-Karte entspricht. Dies überschreitet in Kombination mit den anderen benötigten Bibliotheken und des eigenen Programms allerdings die Leistungskapazität des Arduino Uno. Wir haben zunächst versucht das SD-Karten Format zu verändern, was allerdings zu zahlreichen anderen Problemen führte. Schließlich haben wir uns dazu entschieden auf einen weiteren Arduino Mega 2560 umzusteigen, da dieser deutlich leistungsfähiger ist, was sich beispielsweise daran gezeigt hat, dass dasselbe Skript, das auf dem Arduino Uno 103% des Arbeitsspeichers belegte, auf dem Mega gerade einmal 29% belegte.

Die endgültige Aufgabe dieses ersten Arduinos ist den aktuellen GPS Standort zu ermitteln und per SMS an eines unserer Handys zu schicken. Der aktuelle GPS Standort wird alle zwei Sekunden abgerufen und auf eine SD-Karte gespeichert,

gemeinsam mit GPS bezogenen Daten, wie Höhe, Geschwindigkeit, Neigungswinkel, etc. Da wir in einer derartig hohen Frequenz den Standort zur Verfolgung nicht benötigten, haben wir festgelegt, dass die SMS nur jede Minute verschickt wird.

Der zweite Arduino Mega 2560 wurde von uns mit allen anderen Sensoren ausgestattet (Wettersensoren, etc). Das Ansprechen der Sensoren wurde erneut erheblich durch Programm-Bibliotheken erleichtert. Besonders erwähnenswert sind hier die Bibliotheken von Adafruit. Bei Adafruit handelt es sich um ein Unternehmen, das Produkte rund um Mikrocontroller, worunter auch Raspberry Pis und Arduinos fallen, vertreibt. Was Adafruit besonders auszeichnet ist, dass sie zu nahezu jedem Produkt einen großen Tutorial-Bereich, wie auch nützliche Programm-Bibliotheken anbieten. Unser endgültiges Programmskript speichert ebenfalls im zwei Sekundentakt die durch Sensoren erfassten Messwerte auf einer SD-Karte ab.

Um schließlich die Daten der beiden Arduino Megas zu synchronisieren, haben wir die eingebauten RTCs benutzt. RTC steht für Real-Time-Clock (zu Deutsch: Echtzeituhr) und ist vereinfacht gesagt eine Uhr, dessen Uhrzeit sich mit Hilfe von Programmcode auslesen lässt.

Als Speicherformat haben wir uns für CSV entschieden, wobei Einzelwerte mit einem Sonderzeichen, in unserem Fall einem Semikolon (";") abgetrennt werden. So lassen sich die Einzelwerte der Sensoren rückwirkend leicht wieder auslesen.

Raspberry Pi Zeros

Die Raspberry Pi Zeros sind jeweils mit einem Kamera-Modul verbunden und haben die Aufgabe ein Video aufzuzeichnen. Besonders wichtig ist, dass nicht eine große Datei erstellt wird, sondern viele kleine. Wenn eine große Videodatei erstellt wird und aus irgendeinem Grund der Raspberry Pi Zero oder die Kamera oder sonstige Komponenten ausfallen, so ist die gesamte Videodatei beschädigt und unverwendbar. Wir haben uns deshalb entschieden ein Linux Bash-Skript zu programmieren, dass das Kamera-Modul jedes Mal aktiviert, wenn die aktuelle Minute der Uhrzeit eine gerade Zahl ist. Das Skript startet dann eine 30 Sekunden Aufnahme und speichert die Datei ab. So werden kontinuierlich 30 Sekunden aufgenommen und 30 Sekunden pausiert. Dies haben wir mit Hilfe eines sogenannten

„Cron-Jobs“ umgesetzt. Bei einem Cron-Job handelt es sich um eine zeitbasierte Prozessausführung, die unter Linux-System zur Verfügung steht. Diese Programmierung der Raspberry Pi Zeros minimiert das Risiko von beschädigten Videodateien.

Skripte der einzelnen Microcontroller



Selbstverständlich stellen wir auch gerne unseren Quellcode zur Verfügung. Wir haben die Dateien auf einem Google Drive hochgeladen. Mit dem nebenstehenden QR-Code, wie auch dem Link in der Bildunterschrift kann man diese zu jeder Zeit aufrufen und herunterladen.

*Abbildung 11,
<https://drive.google.com/open?id=1qjdpqVuudBTDW2y8RPs9bkc48ADtFARg>.*

Sondenaufbau

Um den stark limitierten Platz in der Sonde optimal zu nutzen, haben wir uns dafür entschieden in deren Innenraum ein Regal-Stecksystem für die Mikrocontroller zu entwickeln. Dieses haben wir mithilfe des Onlinedienstes „TINKERCAD“ modelliert und am schuleigenen 3D-Drucker gedruckt.

Dieses System besteht aus drei Regalebenen:

Die unterste beherbergt den Arduino Uno mit dem GSM-Shield, so dass dessen Antennen parallel zu den Flügeln der Sonde verlaufen und nicht im Kamerabild zu sehen sind. Ebenfalls befindet sich auf dieser Ebene der Raspberry Pi Zero, der nach unten filmte und dessen Kamera durch den Boden führt.

Auf der mittleren Schicht liegen die beiden anderen Raspberry Pi Zeros in ihren Halterungen, um gegenüberliegende Aufnahmen des Horizonts zu machen.

Die oberste Ebene bilden beide Arduino Mega 2560 mit den Sensoren und mit dem GPS- und SMS-Modul.



Abbildung 12, 3D-gedrucktes Regal.

Die beiden Battery-Packs, die Verkabelung und der USB-Hub sind seitlich neben dem Regal und zum Teil über der letzten Regalebene untergebracht.

Die drei Kameras, die GPS-Antenne, sowie der Umweltsensor und einer der Temperatursensoren wurden durch Löcher im Styropor aus der Sonde hinausgeführt. Diese Löcher wurden anschließend zur Wärme-Isolierung mit Silikon verschlossen.

Rechtliches

Für einen rechtlich abgesicherten Start eines „Unbemannten Freiballons“ ist es vorteilhaft, wenn dieser unter die Klassifizierung „leicht“ fällt, da diese die geringsten Anforderungen stellt. Bedingung für diese Klassifizierung ist es, dass die Gesamtmasse des Gespanns geringer ist als vier Kilogramm. Ebenfalls darf es nur Nutzlastpakete mit einer Masse von weniger als drei Kilogramm besitzen. Ein weiterer Faktor ist die Reißfestigkeit der Verbindungsschnur, die eine Reißfestigkeit von weniger als 230 N haben muss, sowie die Flächendichte, welche sich durch folgende

Formel berechnen lässt:
$$\frac{\text{Masse [g]}}{\text{Fläche der kleinsten Oberfläche [cm]}}$$

Die Flächendichte sollte geringer als 13 g/m^2 sein, um diese Klassifizierung zu erfüllen. Wird die Styroporsonde von „Stratoflights“ verwendet, so ist die kleinste Oberfläche 396 cm^2 groß. Weitere Sonderfälle, welche die Klassifizierung als „leicht“ zulassen gehen aus Abb. 13 hervor.

MERKMALE		MASSE DER NUTZLAST (kg)					
		1	2	3	4	5	6 oder mehr
SEIL oder ANDERE AUFHÄNGUNG 230 N oder MEHR		SCHWER					
EINZELNES NUTZLASTPAKET	FLÄCHENDICHTE größer oder gleich 13 g/cm^2						
<div style="border: 1px dashed black; padding: 2px; width: fit-content;"> FLÄCHENDICHTERE-RECHNUNG MASSE (g) Fläche der Weitesten Oberfläche (cm^2) </div>		LEICHT		MITTEL-SCHWER			
FLÄCHENDICHTE größer oder gleich 13 g/cm^2							
GESAMT MASSE <small>(falls Aufhängung, Flächendichte und Masse einzelner Pakete keine begrenzenden Faktoren sind)</small>							

Abbildung 13, <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:281:0001:0066:DE:PDF>, Seite 55

Um den Ballonaufstieg anzumelden, ist es notwendig diesen bei der jeweils zuständigen Landesluftfahrtbehörde des Bundeslandes anzumelden. Hierfür empfiehlt sich das Anmeldungs-Tool auf der Website von „Stratoflights“. Ebenfalls auf der Website findet sich eine Liste der jeweiligen Anschriften und E-Mail-Adressen aller Landesluftfahrtbehörden. Für die Genehmigung durch die Landesluftfahrtbehörde ist außerdem ein Versicherungsnachweis einer sogenannten „Luftfahrt-Halterhaftpflichtversicherung“ notwendig.

Erhält man die Genehmigung für den gewünschten Starttermin und plant diesen innerhalb der unmittelbaren Umgebung und den Kontrollzonen von Flughäfen, so ist die Genehmigung der Landesluftfahrtbehörde, sowie das Formular zur Anmeldung

auch an die Deutsche Flugsicherung (DFS) weiterzuleiten und muss von dieser ebenfalls bestätigt werden.

Da diese Bestätigungen einige Zeit beanspruchen können, sollte der Ballonstart möglichst frühzeitig angemeldet werden, um diese Genehmigungen rechtzeitig zu erhalten.

Vor dem Start der Sonde muss diese mit den Kontaktdaten, also Name, Telefonnummer und Anschrift versehen werden, ratsam ist jedoch ebenfalls ein Hinweis für potenzielle Finder, dass es sich hierbei um ein ungefährliches Wetterexperiment handelt.

Sämtliche Unterlagen, also die Genehmigungen und die Versicherung, sollten während der Verfolgung und dem Aufsuchen des Ballons vorzeigbar sein.

Start des Stratosphärenballons

Erster Startversuch

Unser erster Starttermin war für den 02. April 2019 angesetzt. Diesen Termin haben wir gewählt, da die Wetterverhältnisse zunächst vorteilhaft vorausgesagt wurden. Dies entsprach wenig Wind, einer angenehmen Temperatur und einer geringen Bewölkung.

Unsere Vorbereitungen liefen zunächst gut, denn die Elektronik war fertig programmiert und die Sonde musste lediglich noch zusammengebaut werden. Beim Testdurchlauf der Sensoren haben wir festgestellt, dass die Raspberry Pi Zeros (Kameras) nach einiger Zeit abstürzen. Im schlimmsten Fall hätten wir nur wenige Minuten des Flugs gefilmt und den restlichen Flug hätten die Kamera-Module ohne Funktion in der Sonde gelegen. Die Ursache für diese Abstürze in kürzester Zeit zu ermitteln und zu beheben war keine Leichtigkeit und so mussten wir bis zum letzten Tag vor dem Start noch an der Elektronik arbeiten, was bedeutete, dass wir erst am Morgen des Starttermins die Sonde zusammensetzen konnten.

Am Tag des Starts galt es für uns möglichst schnell die Sensoren in die Sonde einzubauen und den Wetterballon mit dem Fallschirm, wie auch den Fallschirm mit der Sonde zu verbinden. Wir wurden bei diesem Zusammenbau von einigen Pressevertretern begleitet. Als wir mit der Konstruktion zufrieden waren, gingen wir auf den Schulhof, wo der Start stattfinden sollte. Es gibt auf unserem Schulhof eine relativ große Fläche, die sich für diesen Start gut anbietet, da im Umkreis von ca. 15 Metern keine Bäume sind und auf diese Weise auch die Presse, wie auch interessierte Schüler den Start verfolgen konnten.

Allerdings mussten wir feststellen, dass das vorhergesagte Wetter leider nicht der Realität entsprach. Die Temperatur war zwar angenehm, doch eine hohe Bewölkung, Regen und auch sehr böiger Wind erschwerten den Start erheblich. Da aber der Termin so festgelegt war, entschieden wir uns fortzufahren. Beim Befüllen des Ballons mussten wir jedoch feststellen, dass der Wind den Ballon sehr stark verzieht und nahezu unberechenbar ist.

Beim Aufstieg des Ballons wurde dieser von einer Windböe erfasst und geriet für uns außer Kontrolle. Nur wenige Meter entfernt verding sich die Sonde in einem Baum und die Oberfläche der Ballonhaut wurde von einem Ast durchlöchert. Die Elektronik konnte ohne Schäden gerettet werden und so stand fest, dass ein zweiter Startversuch in möglichst naher Zukunft gemacht wird.

Um beim zweiten Versuch besser vorbereitet zu sein, setzen wir fortan den Fokus auf einen optimalen Start, was bereits bei der Wahl des zweiten Starttermins eine große Rolle spielte. Die Wettervorhersage für den 08. April 2019, also nur sechs Tage später, sah erneut optimale Bedingungen vorher. Zudem musste die Landesluftfahrtbehörde den gewünschten Starttermin erneut freigeben, was nach einem Telefonat und einer E-Mail allerdings schnell erledigt war. Schließlich brauchten wir einen neuen Ballon und eine neue Sonde, die wir auch rechtzeitig erhalten sollten. Die nächsten Tage verbrachten wir mit intensiver Fehleranalyse und trafen Vorkehrungen, die uns mehr Kontrolle über den Ballon verschafften. Dies beinhaltet beispielsweise eine zweite Sicherheitsschnur, mit der wir den Ballon selber steuern konnten oder auch die Suche eines noch risikoärmeren Startplatzes als den Schulhof.

Zweiter Startversuch

Das Wetter war, wie in der Vorhersage vorausgesagt, an diesem Tag optimal. Wir hatten sehr wenig Wind, eine angenehme Temperatur und nur vereinzelte Wolken. Später am Tag sollte es noch regnen, was sich ebenfalls bewahrheitet hat. Der Regen setzte allerdings erst ein, nachdem der Ballon endgültig gelandet ist.

Da bereits alle Komponenten komplett fertig programmiert und optimiert waren, war der zweite Start für uns deutlich einfacher. Bereits einige Tage vorher befestigten wir den Fallschirm an der Sonde und bauten die Elektronik ein. Wir bereiteten alles soweit vor, dass wir am Starttag nur noch die Batterien anschalten und den Ballon befestigen mussten.

Am Starttag kontrollierten wir ein letztes Mal die korrekte Funktion unserer Elektronik und machten uns auf den Weg zum Startplatz. Dieses Mal haben wir uns für das Dach

unserer Schule entschieden, das in Kombination mit dem geringen Wind einen optimalen Startplatz darstellte. Bei der Befüllung des Ballons waren wir besonders vorsichtig, um das Risiko zu vermeiden, dass irgendwelche spitzen Gegenstände in die Nähe des Ballons geraten. Aus diesem Grund haben wir während des Befüllvorgangs als zusätzlichen Schutz Einmal-Handschuhe getragen. Schließlich konnten wir den Ballon mit Hilfe einer zweiten Sicherheitsleine gezielt und kontrolliert in die Höhe aufsteigen lassen, bis wir endgültig die Sonde losgelassen haben.



Abbildung 14, Stratosphärenballon durch das Celestron 11 Teleskop auf einer Höhe von ca. 14 km.

Nun war es an der Zeit den Aufstieg des Ballons zu betrachten und über unser GPS-Modul und das Amateur-Funk-Gerät von Herrn Daniels zu verfolgen. Eine dabei entstandene Aufnahme ist in Abbildung Abb. 14 zu sehen. Diese wurde mit Hilfe eines Celestron 11-Teleskops des Schülerlabors Astronomie fotografiert. Mit Hilfe einer Flugroutenberechnung des Online-Dienstes „habhub“ waren wir in der Lage einen ersten möglichen Landeplatz festzulegen, den wir grob ansteuern konnten. Allerdings stellten wir anhand der Daten fest, dass der Ballon leicht von der Flugroute abgewichen war und so mussten wir unser Fahrtziel mehrfach aktualisieren. Der Ballon landete nach einem Flug über Wülfrath, Wuppertal und Remscheid schließlich

unbeschädigt auf einer Wiese in Radevormwald, die nur 17,69 Kilometer von unserem Startplatz, dem Carl-Fuhlrott-Gymnasium, entfernt ist.

Auswertung der Daten

Flugroute

Die aufgezeichneten GPS Daten unseres GPS-Moduls wie auch die des Amateur-Funk-Geräts lassen sich beispielsweise in Google Earth importieren, wodurch die Flugkurve sowie das dazugehörige Höhenprofil dargestellt wird. Die entstandenen Grafiken sind in in Abbildung Abb. 15 und Abb. 16 dargestellt.

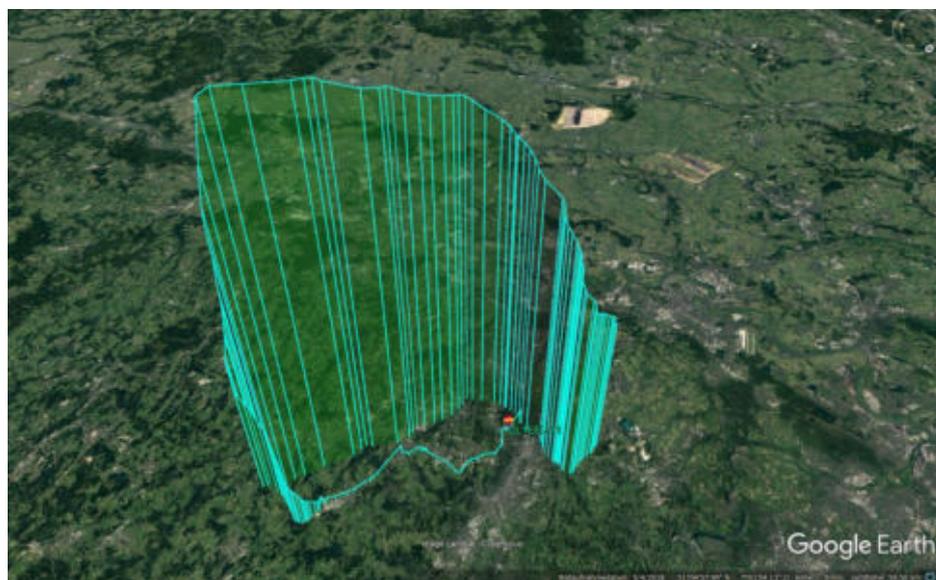


Abbildung 15, Flugkurve in Google Earth.



Abbildung 16, Flugkurve in Google Earth.

Wetterdaten

Höhe

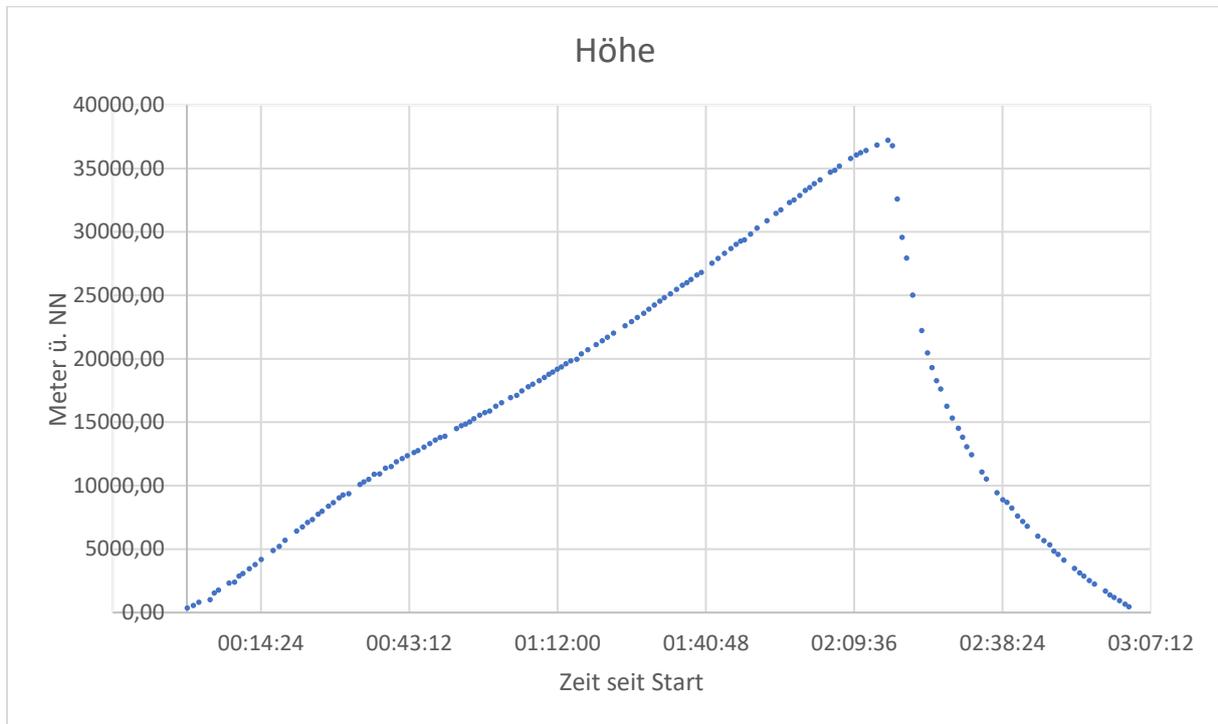


Abbildung 17, Höhenprofil des Amateurfunkmoduls.

Aus dem Höhenprofil erkennt man, dass der Aufstieg mit einer nahezu konstanten Geschwindigkeit verlief. Diese betrug im Mittel 4,5 Meter pro Sekunde. Der Stratosphärenballon stieg innerhalb von 2 Stunden und 17 Minuten auf eine Maximalhöhe von 37222 Meter. Zu diesem Zeitpunkt hatte sich die Ballonhülle auf ca. 12 Meter Durchmesser ausgedehnt und platzte aufgrund der zu großen Druckdifferenz. Das Zurückfallen des Ballons verlief jedoch, wie aus Abb. 17 zu erkennen ist nicht linear. Grund dafür ist, dass die Luft in diesen Höhen deutlich dünner ist, also gibt es auch kaum einen Strömungswiderstand. Dieser Strömungswiderstand (Reibung mit der Umgebungsluft) ermöglicht, dass der Fallschirm die Sonde bremst. Die ersten Minuten nach dem Platzen des Ballons fiel dieser mit bis über 3000 Metern pro Minute (50 m/s). Umso tiefer der Ballon dann fiel, desto mehr bremste der Fallschirm den Fall, sodass er ab ca. 4 km Höhe nur noch mit 300 Metern pro Minute (5 m/s) fiel. Der Landeort lag, ähnlich wie der Startplatz, auf einer Höhe von ca. 360 Meter ü. NN.

Temperatur

Wie zuvor beschrieben gab es an unserer Sonde drei verschiedene Temperatursensoren. Zwei Temperaturen waren dafür zuständig die Außentemperatur zu messen und ein dritter hat während des Flugs die Innentemperatur gemessen. Die dazugehörigen Daten sind in Abbildung Abb. 18 dargestellt.

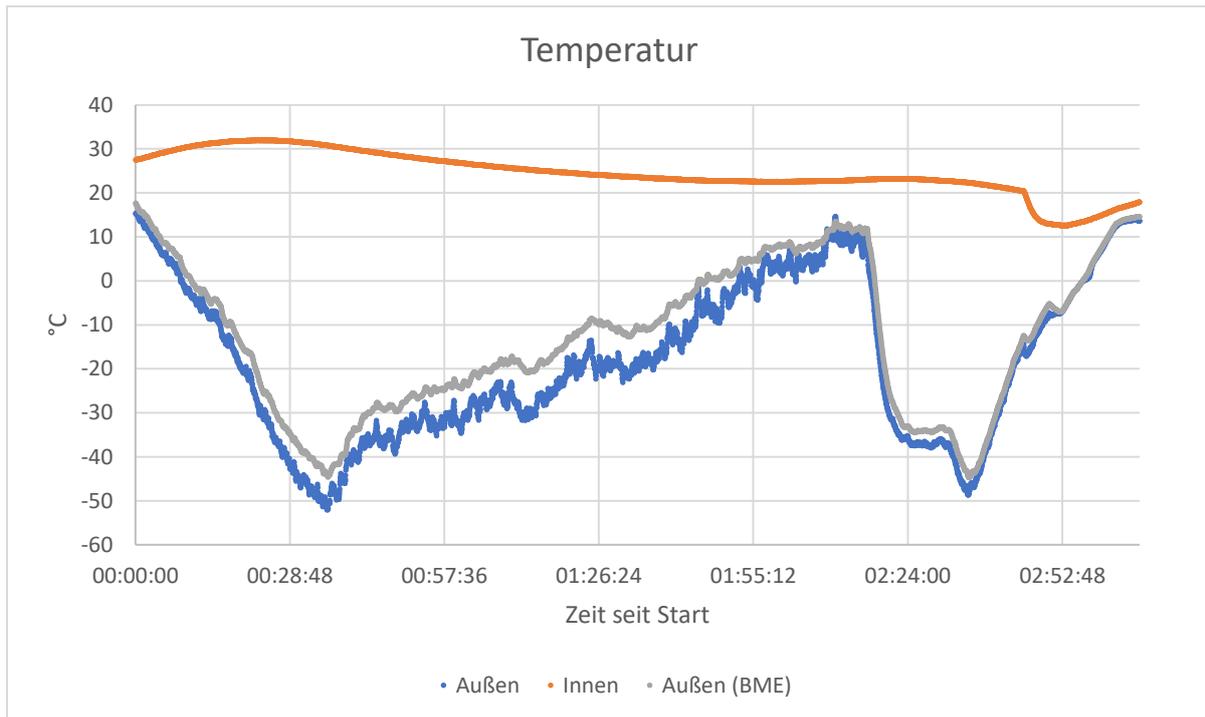


Abbildung 18, Temperaturverlauf der Innen- und Außentemperatur.

Man kann mit Leichtigkeit erkennen, dass die Sensoren zur Messung der Außentemperatur einen sehr ähnlichen Verlauf haben, jedoch ist die Differenz der beiden Graphen nicht zu vernachlässigen. Die Messung des allgemeinen Wettersensors (BME) ist vermutlich ungenauer, da dieser bei derartig niedrigen Temperaturen nicht im optimalen Funktionsbereich (nach Angaben des Herstellers) des Sensors liegt. Die Temperatursensoren DS18B20 haben einen deutlich weiteren Funktionsbereich und funktionieren somit sogar bis zu -55 °C mit einer Genauigkeit von $\pm 2\text{ °C}$. Somit sollte man in der Abbildung Abb. 18 die Daten des blauen Graphen als tatsächliche Temperatur betrachten. Die niedrigste erreichte Temperatur während unseres Flugs liegt bei $-52,06\text{ °C}$, was im Funktionsbereich des Sensors liegt.

Die Innentemperatur hingegen weist nur minimale Schwankungen auf und hat insgesamt gerade einmal eine Temperaturamplitude von 19,44 °C, wobei die maximale Temperatur 32 °C und die Minimale 12,56 °C beträgt. Man kann demnach sagen, dass die Isolation durch die Styroporsonde optimal funktioniert hat. Die von uns verwendeten Leistungsbatterien waren somit nicht unbedingt notwendig. Eine einfache Powerbank hätte bei einer solch guten Isolation ebenfalls den Zweck erfüllt.

Luftfeuchtigkeit

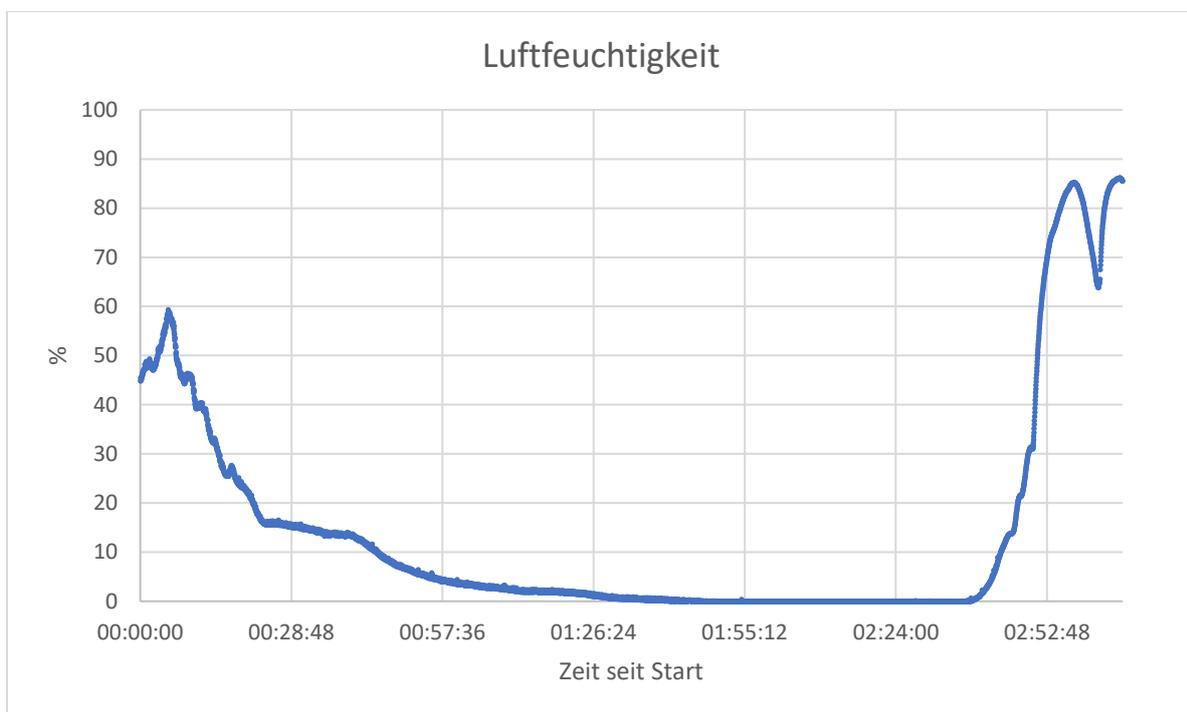


Abbildung 19, Verlauf der Luftfeuchtigkeit.

Die Luftfeuchtigkeit bezeichnet den Anteil des Wasserdampfs am Gasgemisch der Erdatmosphäre. Luftfeuchtigkeit lässt sich in verschiedenen Maßen, wie z.B. der absoluten oder spezifischen Luftfeuchtigkeit angeben. Das geläufigste und auch von uns verwendete Maß ist die relative Luftfeuchtigkeit, die das Verhältnis des momentanen Wasserdampfgehalts in der Luft zum maximal möglichen Wasserdampfgehalt angibt.

Anhand unserer Daten, die in Abbildung Abb. 19 dargestellt sind, lässt sich erkennen, dass die Luftfeuchtigkeit mit steigender Höhe abnimmt. Die Luftfeuchtigkeit in der Stratosphäre selber ist so gering, dass sie sich mit einfachen Sensoren nicht mehr

messen lässt. Für solch genaue Messungen werden CFH-Sonden (Cryogenic Frost Point Hygrometer) benötigt, die mit deutlich genaueren Messinstrumenten ausgestattet sind.

Interessant sind des Weiteren die stark ansteigenden Intervalle der Messdaten, besonders die nach ca. 5 Minuten und ca. 3 Stunden. Zu dieser Zeit befand sich die Sonde in der Wolkenschicht. Beim Aufstieg, also bei 15 Minuten, flog die Sonde durch die Wolkenschicht und die Luft erreicht eine Feuchtigkeit von ca. 60 %. Noch deutlich höher sind die Messwerte auf dem Rückflug der Sonde, da sie diesmal durch Regenwolken geflogen ist. Die Messdaten zeigen, dass die Luft eine Feuchtigkeit von fast 90 % hatte.

Luftdruck

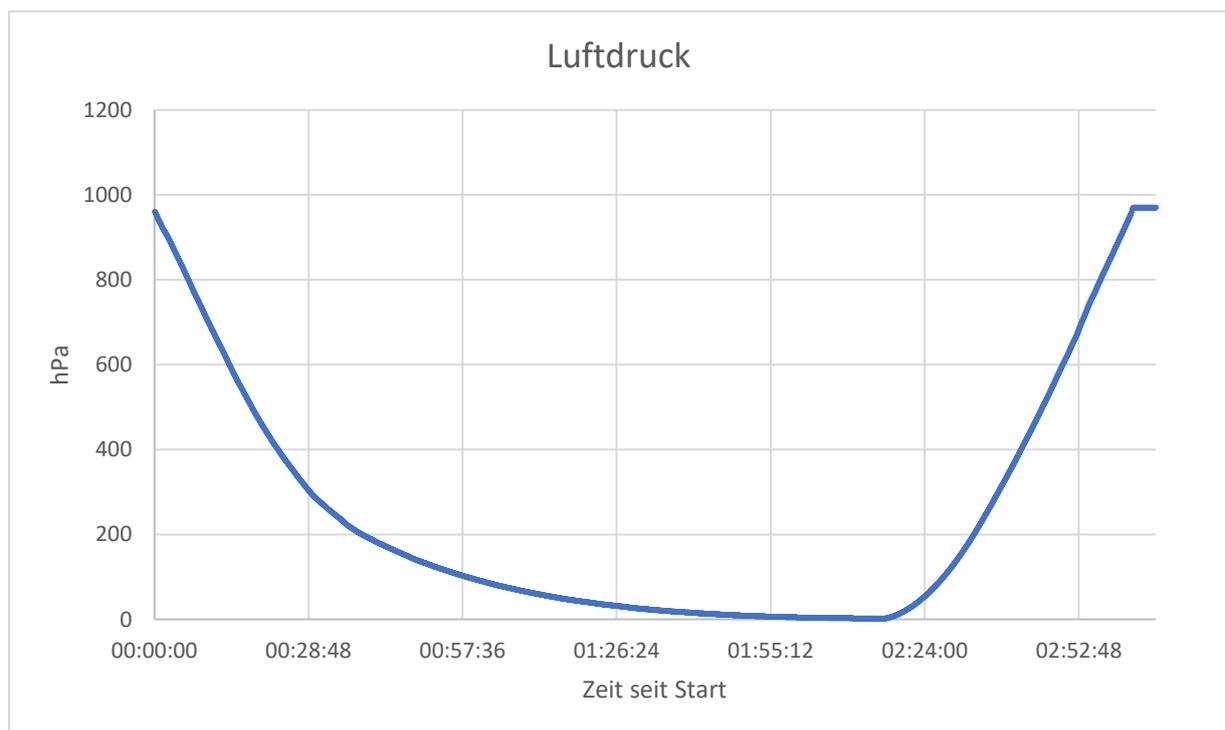


Abbildung 20, Verlauf des Luftdrucks.

Der Luftdruck ist der Druck der Luftsäule über einem Bezugspunkt, welche durch die Gravitation beeinflusst wird. Mit zunehmender Höhe wird also die Luftsäule über dem Bezugspunkt geringer, also auch der Luftdruck. Dieser beträgt im Mittel auf Meereshöhe ca. 1013,25 hPa. Jedoch ist der Luftdruck neben der Höhe auch durch Wetterphänomene bedingt. Die 971 hPa beim Start sind durch die Höhe des

Schuldaches zu erklären. Der Abfall des Luftdrucks mit zunehmender Höhe lässt sich über die barometrische Höhenformel bestimmen:

$$p(h) = 1013,25 * \left(1 - \frac{0,0065K}{288,15K} * h \right)^{5,255}$$

Hierbei geht man von Referenzwerten auf Meereshöhe aus. Hierbei beträgt der Luftdruck $1013,25 \text{ hPa}$ und die Temperatur $288,15 \text{ K} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$. Ebenfalls wird von einem Temperaturgradienten, also eine Temperaturabnahme pro zunehmenden Höhenmeter, von $0,0065 \frac{^\circ\text{C}}{\text{m}}$ ausgegangen. Aus dieser Formel lässt sich also folgern, dass es sich um einen exponentiellen Abfall des Luftdrucks mit zunehmender Höhe handelt, wobei die barometrische Höhenformel jedoch nur bis 11 km ü. NN gültig ist.

Dieser exponentielle Abfall ist aus dem Diagramm deutlich zu erkennen. Bis ca. 2 Stunden und 20 Minuten nach dem Start nimmt also der Luftdruck exponentiell ab. Dies ist der Zeitpunkt, an dem der Ballon geplatzt ist. Aufgrund der Fallgeschwindigkeit, welche, wie in Abb. 17 zu erkennen ist, anfangs höher ist, bis der Fallschirm durch den höher werdenden Luftwiderstand die Sonde effektiver bremst, ist die Abnahme des Luftdrucks gegenüber der Zeit annähernd linear. Bei einer konstanten Fallgeschwindigkeit würde sich jedoch wieder die exponentielle Zunahme des Luftdrucks ergeben.

Gas

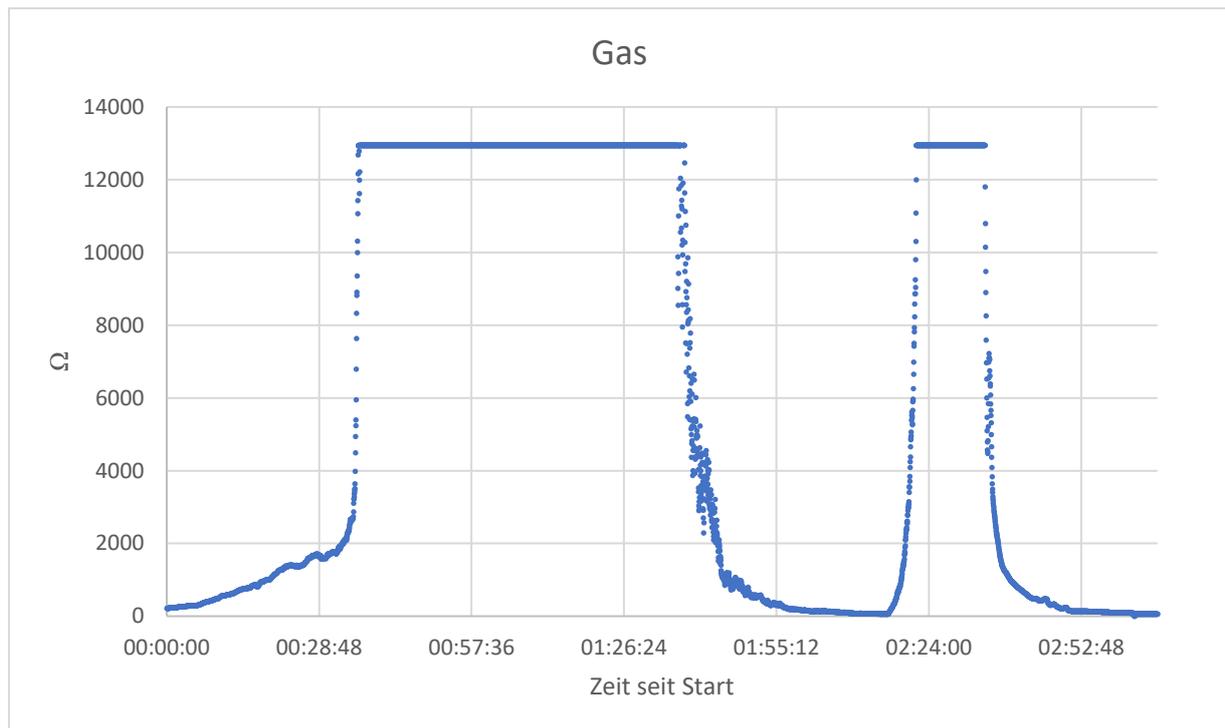


Abbildung 21, Verlauf des elektrischen Luftwiderstands (Gas).

Üblicherweise werden diese Widerstandswerte von Gassensoren zusammen mit Luftfeuchtigkeit und Temperatur in einen sogenannten Indoor Air Quality Index (IAQ) umgerechnet. Anhand der unterschiedlichen Gewichtung der drei Faktoren erhält man so einen Wert, der Aufschluss über die Luftqualität gibt. Für unsere Messwerte liegt dieser Index stets im besten Bereich, wobei zu bedenken ist, dass dieser Index für Wertebereiche gedacht ist, welche in Innenräumen auftreten. Folglich sind unsere Werte mit Temperaturen von unter -50 °C nicht im geeigneten Wertebereich dieser Funktion.

Interessant ist jedoch, dass der gemessene Widerstand des Gassensors zwischen 0:36 – 1:36 Std. und 2:22 – 2:34 Std. deutlich höher ist als während des gesamten restlichen Flugs und eine Sättigung erreicht. Nach Höhenprofil befindet man sich jeweils auf einer Höhe von ca. 10-23 Kilometern. Diese Höhe entspricht grob des Bereichs der Tropopause, also dem Bereich, der die Troposphäre von der Stratosphäre trennt. Ein höherer Widerstand entspricht nach IAQ einer besseren Luftqualität, was bedeutet, dass die Luftqualität in der Tropopause besser als jene in der Troposphäre und Stratosphäre ist.

Kameras



Abbildung 22, Blick auf das Dach des Schulzentrum Süds und den Fernmeldeturm „Rigi Kulm“.



Abbildung 23, Blick auf das Gelände des Schulzentrum Süds.



Abbildung 24, Blick auf Wolkenformationen aus der maximalen Flughöhe von 37222 Meter ü. NN.



Abbildung 25, Blick auf eine Wolkendecke kurz vor der Landung der Sonde.



Abbildung 26, Blick zwischen zwei Wolkenformationen mit Reif auf dem Visier des „CFG-Astronauten“.

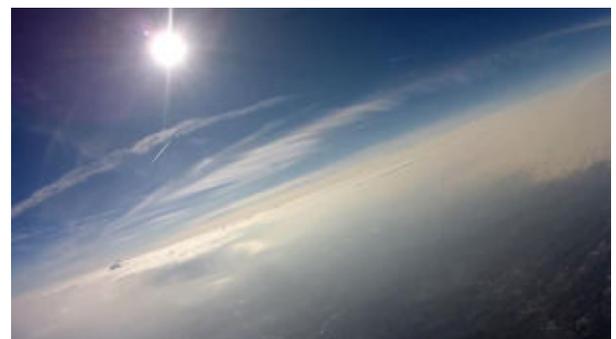


Abbildung 27, Blick auf Kondensstreifen und Wolken während des Aufstiegs über Wuppertal.

Epilog

Erfahrungsbericht

Man kann festhalten, dass uns das Stratosphärenprojekt große Freude bereitet hat und wir unser Leben lang von dieser Erfahrung profitieren werden. Selbstverständlich gab es auch Momente, die sehr stressig und nicht immer unbedingt angenehm waren. Beispielsweise hatten unsere Kameras beim letzten Testdurchlauf, der einen Tag vor dem ersten Start stattgefunden hatte, ein schwerwiegendes Problem, das sich nicht einfach lösen ließ. Obwohl wir zu dieser Zeit eigentlich schon die Sonde fertig bauen wollten, konnten wir nicht fortfahren. Oft mussten wir beim Programmieren feststellen, dass unsere Programme zu Fehlern führen oder beim Löten, dass unsere Lötstelle nicht sauber oder sogar am falschen Platz war. Durch solche Erfahrungen haben wir viel gelernt und hoffen, dass wir mit Hilfe dieser Facharbeit einige Abläufe so genau beschreiben konnten, dass künftig Schüler, die einen weiteren Stratosphärenballon starten wollen, einige dieser Fehler nicht mehr machen müssen.

Insgesamt lässt sich das Projekt als sehr positive Erfahrung zusammenfassen, die wir jedem Schüler empfehlen würden. Es bereitet eine riesige Freude und der gesamte Entwicklungsprozess (Komponenten Auswahl, Elektronik löten, Programmierung, Tests) ist zwar eine enorme Arbeit, aber auch ein großes Vergnügen. Man lernt, in stressigen Situationen Konzentration und Ruhe zu bewahren. Der Start an sich ist selbstverständlich ein unbeschreiblicher Moment. Sei es wie bei unserem Start, dass der Ballon abstürzt oder dass er wie bei unserem zweiten Start in die Lüfte steigt. Diesen Moment trägt man sein Leben lang mit sich und wenn schließlich alles funktioniert hat, verspürt man eine außerordentliche Erleichterung.

Abschließende Worte zum Projekt

Wir haben einige Erfahrung bei der Entwicklung gemacht, die wir abschließend nochmals in diesem Abschnitt hervorheben möchten, da diese unbedingt vermieden werden sollten bzw. nicht erneut gemacht werden müssen.

Zunächst sollte man bei der Komponentenwahl nicht an den falschen Stellen versuchen Geld einzusparen. Beispielsweise gab es den BME680 wenige Euro günstiger bei einem anderen Anbieter als Adafruit. Adafruit bietet allerdings zu ihren Sensoren immer eine sehr ausführliche Produktbeschreibung, ein Tutorial wie auch Programm-Bibliotheken, die die Entwicklung mit dem Sensor erheblich vereinfachen. Wir haben es schließlich zwar auch mit dem BME680 des anderen Anbieters hinbekommen, allerdings mussten wir einige Stellen komplett umprogrammieren, was mit sehr viel Arbeit verbunden war.

Man sollte bereits vorher genau planen, wo welcher Sensor auf dem Arduino verlötet wird, sodass man im Zweifel nicht alles neu löten muss. Leider war es bei uns so, dass unser GPS- und SMS-Modul auf dem Arduino Uno aufgrund von Programmierspeichermangel nicht funktioniert haben. Dieses Problem haben wir im Kapitel „Programmierung“ genauer erläutert. Der Umstieg auf einen Arduino Mega 2560 schien zunächst die einfachste Lösung zu sein, doch leider sind die Anschlüsse auf dem Arduino Uno nicht genauso wie auf dem Arduino Mega 2560. Dies bedeutete, dass wir die gesamten Kabel auf andere Pins umlöten mussten. Man könnte von Anfang an planen auf Arduino Mega 2560 zu entwickeln, was programmierspezifische Vorteile bietet (mehr Programmierspeicher, mehr Arbeitsspeicher, schnellerer Prozessor). Das einzige, was man bedanken sollte, wenn man sich für die Megas entscheidet ist der große Platz, den diesen einnehmen.

Wie zuvor beschrieben haben wir den Innenraum der Sonde mit Hilfe eines 3D gedruckten Regals ausgestattet, um den Platz besser zu verwalten und um die Controller zu schützen. Unser Regal hat zwar seinen Zweck erfüllt und es hat am Ende auch so funktioniert, doch wir halten es bis jetzt nicht für eine optimale Lösung. Beispielsweise waren die Kabel, die von dem Controller ausgingen, sehr lang, was dementsprechend auch viel Platz eingenommen hat. Solch lange Kabel wären nicht nötig gewesen, an dieser Stelle hätte man viel Platz einsparen können. Da nun der gesamte untere Platz in der Sonde aufgebraucht war, mussten wir schließlich die Battery-Packs oben auf die anderen Komponenten drauflegen. Dies hatte zwar den Vorteil, dass wir die Battery-Packs ganz zum Schluss anschalten konnten und so möglichst wenig Strom verbraucht haben, allerdings lagen die Battery-Packs auf den

verlöteten Komponenten und dessen Verbindungskabel. Wäre nun eine Lötstelle abgebrochen oder ein Kabel stark verbogen, hätte es zu einzelnen Sensorfehlern oder sogar auch komplett fehlerhaften bis überhaupt gar keine Daten führen können. Wir können bis jetzt nicht genau sagen, warum der Geiger-Zähler nicht funktioniert hat, doch wir halten dies für eine realistische Ursache.

Danksagung

Zunächst möchten wir uns im Allgemeinen bedanken für die vielseitige Unterstützung, die wir während unserer Arbeit und Forschung erhalten haben.

Ganz besonders möchten wir uns bei unserem Betreuungslehrer Herr Daniels bedanken, der uns nicht nur motiviert und während des gesamten Projektes in großen Maßen unterstützt hat, sondern uns auch fachlich hervorragend auf das Projekt vorbereitet hat.

Wir bedanken uns ganz herzlich bei Herrn Michael Winkhaus, über den wir Fördermittel der Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung und der Deutschen Physikalischen Gesellschaft zugesichert bekamen. Ohne die finanzielle Unterstützung wäre unser Projekt nicht möglich gewesen.

Ebenfalls möchten wir uns bei unseren Mitschülern Henri Wagner und Julius Chur bedanken, die uns an beiden Startterminen tatkräftig unterstützt haben.

Derselbe Dank gilt Herrn Bernd Koch, der durch seine Unterstützung beim zweiten Start einige Einblicke mit Teleskopen gewähren konnte und so für äußerst ansehnliche Aufnahmen gesorgt hat.

Zudem danken wir Herrn Johannes Redetzky, der uns in medialer Hinsicht unterstützt und den Zusammenbau, wie auch den Start in Form von Bildern festgehalten hat.

Außerdem gilt der Schulleitung des Carl-Fuhlrott-Gymnasiums unser Dank, denn trotz unseres ersten Fehlstarts wurden wir von dieser sofort motiviert einen zweiten Startversuch zu unternehmen. Ganz explizit möchten wir uns bei unserem Schulleiter Herrn Mertens und der stellvertretenden Schulleiterin Frau Dr. Wissemann-Hartmann

bedanken, die uns während beider Startversuche mit großem Interesse begleitet und unseren Forschungsdrang gefördert haben.

Abschließend danken wir Herrn Dr. Tampier und Herrn Stappert, die uns beim Befüllen des Ballons mit ihrem Fachwissen tatkräftig assistiert haben. Dies war uns eine große Hilfe.

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichern wir, dass wir diese Arbeit selbstständig angefertigt, keine anderen als die von uns angegeben Quellen und Hilfsmittel benutzt und die Stellen der Facharbeit, die im Wortlaut oder dem Inhalt aus anderen Werken entnommen wurden, in jedem einzelnen Fall mit genauer Quellenangabe kenntlich gemacht haben.

Wir sind damit einverstanden, dass die von uns verfasste Facharbeit der schulinternen Öffentlichkeit in der Bibliothek der Schule zugänglich gemacht wird.

Benjamin Frost

Hendrik Tackenberg

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1, Schematische Darstellung der Erdatmosphäre.....	3
Grafik: https://de.wikipedia.org/wiki/Stratosphäre	
Abbildung 2, Skizze des grundlegenden Aufbaus.....	5
Grafik: Benjamin Frost	
Abbildung 3, Raspberry Pi Zero mit angeschlossenem Kameramodul.....	6
Foto: Johannes Redetzky	
Abbildung 4, BME680 Umweltsensor.	6
Foto: Johannes Redetzky	
Abbildung 5, DS18B20 Temperatursensor.....	7
Foto: Johannes Redetzky	
Abbildung 6, Halbleiterdetektor für radioaktive Strahlung.	8
Foto: Johannes Redetzky	
Abbildung 7, Arduino Mega 2560 mit GPS- und SMS-Modul.....	8
Foto: Johannes Redetzky	
Abbildung 8, Arduino Mega 2560 mit Umwelt- und Temperatursensoren, sowie Halbleiterdetektor.....	10
Foto: Johannes Redetzky	
Abbildung 9, Fritzing des Aduino Mega 2560 mit den Sensoren und dem Halbleiterdetektor auf dem SD-Logging-Shield.....	11
Screenshot: Benjamin Frost, Hendrik Tackenberg, Software: Fritzing	
Abbildung 10, Fritzing des Arduino Mega 2560 mit dem Fona 800- und dem GPS-Logging-Shield.	14
Screenshot: Benjamin Frost, Hendrik Tackenberg, Software: Fritzing	
Abbildung 11, https://drive.google.com/open?id=1qjdpqVuudBTDW2y8RPs9bkc48ADtFArG	16
Abbildung 12, 3D-gedrucktes Regal.....	17
Foto: Hendrik Tackenberg	

Abbildung 13, <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:281:0001:0066:DE:PDF>, Seite 55.....18

Grafik:

<https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:281:0001:0066:DE:PDF>, Seite 55

Abbildung 14, Stratosphärenballon durch das Celestron 11 Teleskop auf einer Höhe von ca. 14 km.....21

Foto: Bernd Koch, Henri Wagner

Abbildung 15, Flugkurve in Google Earth.....22

Screenshot: Benjamin Frost, Hendrik Tackenberg, Software: Google Earth

Abbildung 16, Flugkurve in Google Earth.....22

Screenshot: Benjamin Frost, Hendrik Tackenberg, Software: Google Earth

Abbildung 17, Höhenprofil des Amateurfunkmoduls.....23

Screenshot: Benjamin Frost, Hendrik Tackenberg, Software: Microsoft Excel

Abbildung 18, Temperaturverlauf der Innen- und Außentemperatur.....24

Screenshot: Benjamin Frost, Hendrik Tackenberg, Software: Microsoft Excel

Abbildung 19, Verlauf der Luftfeuchtigkeit.....25

Screenshot: Benjamin Frost, Hendrik Tackenberg, Software: Microsoft Excel

Abbildung 20, Verlauf des Luftdrucks.....26

Screenshot: Benjamin Frost, Hendrik Tackenberg, Software: Microsoft Excel

Abbildung 21, Verlauf des elektrischen Luftwiderstands (Gas).....28

Screenshot: Benjamin Frost, Hendrik Tackenberg, Software: Microsoft Excel

Abbildung 22, Blick auf das Dach des Schulzentrum Süds und den Fernmeldeturm „Rigi Kulm“29

Foto: Benjamin Frost, Hendrik Tackenberg

Abbildung 23, Blick auf das Gelände des Schulzentrum Süds.....29

Foto: Benjamin Frost, Hendrik Tackenberg

Abbildung 24, Blick auf Wolkenformationen aus der maximalen Flughöhe von 37222
Meter ü. NN.....29

Foto: Benjamin Frost, Hendrik Tackenberg

Abbildung 25, Blick auf eine Wolkendecke kurz vor der Landung der Sonde.....29

Foto: Benjamin Frost, Hendrik Tackenberg

Abbildung 26, Blick zwischen zwei Wolkenformationen mit Reif auf dem Visier des
„CFG-Astronauten“29

Foto: Benjamin Frost, Hendrik Tackenberg

Abbildung 27, Blick auf Kondensstreifen und Wolken während des Aufstiegs über
Wuppertal.....29

Foto: Benjamin Frost, Hendrik Tackenberg