

# Ausflug an den Rand des Weltalls

Vergleich und Auswertung zweier Wetterballon-Flüge



Eine Facharbeit von

Lukas Mattes

Max-Planck-Gymnasium Trier

# Kurzfassung

Wenn man im Internet unterwegs ist, stößt man immer wieder auf Berichte von Flügen an den Rand des Weltraums und ist überwältigt von den Bildern, die dort oben gemacht werden. Und alles scheint so einfach. Man füllt einen Ballon mit ein bisschen Helium, knotet eine Box dran und los geht es. So dachte ich zumindest, als mir die Idee kam, auch mal einen Wetterballon starten zu lassen. Doch nach kurzer Recherche stellte sich heraus, dass es gar nicht so einfach ist und dass dabei viele Dinge zu beachten sind.

Wetterballons werden in der Meteorologie eingesetzt um die Windrichtung in verschiedenen Höhen und die Wolkenhöhe zu messen. Es ist aber auch möglich, als Privatperson einen Wetterballon zu kaufen.

Neben den hoch interessanten physikalischen Abläufen bei einem Ballonflug in 30.000 m Höhe, waren für mich die technischen Aspekte des Versuchsaufbaus besonders herausfordernd. Denn in meinen vorherigen elektrotechnischen Bauten ging es darum, alles so zu bauen, dass es funktioniert und wenn es sich nach fünf Minuten aufhängt, startet man es eben nochmal neu. Auch musste ich nie darauf achten, wie schwer ein Aufbau war und ob er am Ende zwei oder drei Kilo schwerer war, hatte keine Relevanz. Doch wenn man eine Box voller Sensoren an den Rand des Weltalls schickt, kann man nicht nach fünf Minuten die Reset-Taste drücken und muss auf jedes zusätzliche Gramm achten. Aber dazu später mehr. All diese Herausforderungen machten es gerade so interessant und anspruchsvoll, ein solches Projekt mal selber zu versuchen.

Mein Ziel war es, neben einem erfolgreichen Ballonflug im Vorfeld Aussagen über den Verlauf von Luftdruck, Temperatur und Beschleunigung zu machen mit Hilfe von verschiedenen physikalischen Modellen zu treffen und diese dann im Nachhinein mit meinen gesammelten Sensordaten zu vergleichen.

# Gliederung

1. Einleitung
2. Beschreibung der Versuchsaufbauten
3. Hypothese
  - 3.1. Temperatur
  - 3.2. Druck
  - 3.3. Flugweite
  - 3.4. Beschleunigung
4. Durchführung
5. Messungen
  - 5.1. Erster Flug
  - 5.2. Zweiter Flug
6. Auswertung
  - 6.1. Temperatur
  - 6.2. Druck
  - 6.3. Beschleunigung
7. Schätzung der Flughöhe
  - 7.1. Fall- / Sinkgeschwindigkeit
  - 7.2. Druckkurve
8. Andere Messdaten
  - 8.1. UV-Sensor
  - 8.2. Luftfeuchtigkeit
  - 8.3. Temperatur innerhalb der Sonde
9. Gesamtauswertung
10. Fazit

# 1. Einleitung

Ich habe mich in meiner Facharbeit mit dem Bau eines Wetterballons befasst, den ich mit mehreren Sensoren ausgestattet in die Stratosphäre habe aufsteigen lassen. Wichtig für einen erfolgreichen Flug ist eine gute Vorbereitung. Es sollte einem vor dem Steigenlassen bewusst sein, wie komplex und aufwendig so ein Wetterballonflug ist. Neben rechtlichen Dingen wie Genehmigung, Versicherung oder der Absprache mit der Flugsicherung muss vor allem die Technik funktionieren.

Zusammen mit meinem Bruder habe ich im Frühjahr 2019 angefangen, die ersten Pläne zu entwickeln. Es war schnell klar, dass wir zunächst die Technik benötigten, um die Sonde (Box mit Sensoren) nach dem Flug wieder zu finden. Wir entschieden uns für einen einfachen GPS-Tracker. Zudem wollten wir natürlich auf unserem Flug auch Bilddaten sammeln, weshalb auf jeden Fall auch noch eine Kamera mit an Bord musste. Nun kamen wir zur Auswahl der Sensoren. Was auf jeden Fall gemessen werden sollte, waren Temperatur und Luftdruck. Des Weiteren wollten wir die Änderung der UV-Strahlung beim Durchfliegen der Luftschichten messen. Da wir aufgrund erster Schätzungen wohl die Ozon-Schicht passieren würden, erhofften wir uns hiervon sehr interessante Daten. Daneben wollten wir die Beschleunigung der Sonde messen und um im Nachhinein den Weg des Ballons darzustellen, musste noch ein GPS-Modul dazu.

Da man nach dem Start nichts mehr am System im Sondeninneren ändern kann, muss man sich zu 110% auf die verwendete Technik verlassen können. Um das sicher zu stellen, waren im Vorfeld viele Tests, die Beachtung erhöhter Sicherheitsstandards und eine möglichst hohe Redundanz notwendig. Denn wenn ein Sensor in 30.000 m Höhe ausfällt, hat man keinen Einfluss mehr darauf und wenn dann noch kritische Systeme wie der GPS-Tracker ausfallen, verliert man im Zweifel die ganze Sonde.

Ich habe insgesamt zwei Flüge durchgeführt, einmal im am 12. Oktober 2019 und einen weiteren am 18. März 2020. Ich habe in beiden Sonden selben Sensoren verbaut, um eine gute Vergleichbarkeit herzustellen. Im Verlauf meiner Facharbeit werde ich an gegebener Stelle die verschiedenen Ergebnisse vergleichen und auf mögliche Erklärungen für Differenzen zwischen ihnen eingehen.

Im Folgenden werde ich zunächst auf den Aufbau der Sonde eingehen. Danach werde ich mich mit vor dem Flug verfassten Hypothesen über die möglichen Werte der Temperatur-, Luftdruck- und Beschleunigungssensoren befassen. Sodann werde ich die Messwertdiagramme vorstellen und anschließend diese Daten auswerten.

Nachdem ich mich eingehend mit den aus meiner Sicht wichtigsten Messergebnissen des Fluges befasst habe, werde ich zunächst versuchen, eine möglichst präzise Schätzung der letztendlichen Flughöhe abzugeben. Sowohl beim ersten, als auch beim zweiten Flug sammelte das GPS-Modul trotz Upgrade nach dem ersten Flug ab etwa 12 Kilometern Höhe keine Daten mehr. Zum Schluss werde ich noch auf die Messwerte der anderen Sensoren eingehen (v.a. die Luftfeuchte, die UV-Strahlung und die Temperatur innerhalb der Sonde). Nach einer abschließenden Auswertung des Experimentes werde ich dann mit einem Fazit enden.

## 2. Beschreibung der Versuchsaufbauten

Als Grundlage des Versuchs verwendeten wir eine 35 x 25 x 21 cm Styropor-Box welche über ein ca. 15 Meter langes Seil am Fallschirm befestigt war, welcher wiederum am Ballon mit einem weiteren Seil befestigt wurde (Abb. 1). Die Box wurde, um eine noch besserer Isolierung zu schaffen, im Innern mit einer weiteren Schicht Styropor ausgekleidet. Wichtig war es, dass wir für eine ausreichende Zeit die Stromversorgung sicherstellen konnten. Beim ersten Flug setzten wir auf zwei Batteriepacks á fünf Hochleistungs-AA-Batterien. Da aber nach dem ersten Flug die beiden Batteriepacks noch verhältnismäßig voll waren und sich herausstellte, dass die Temperatur in der Sonde nicht so stark sinkt, wie wir im Vorhinein befürchtet hatten, verwendeten wir beim zweiten Flug nur einen Batteriepack und eine zusätzliche Powerbank für die Geräte, die über eine USB-Schnittstelle mit Strom versorgt werden. Diese wiegt im Vergleich genauso viel wie ein Batteriepack, besitzt aber eine sehr viel höhere Energiedichte.

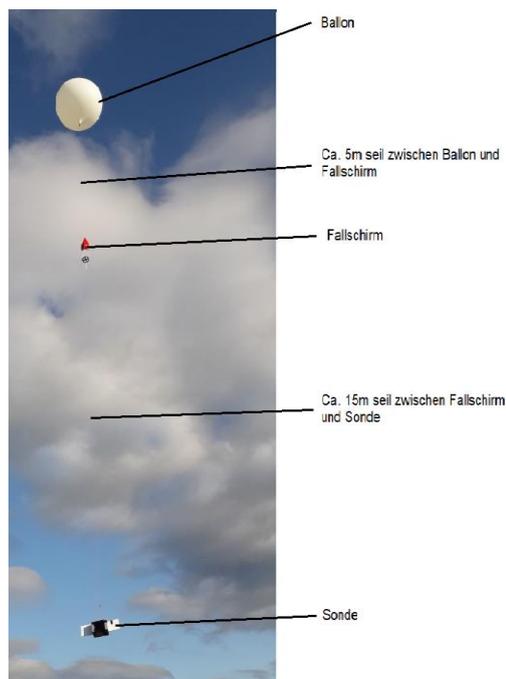


Abbildung 1 Aufbau gesamtes Gespann

Bei einigen Systemen der Sonde mussten wir uns darauf verlassen, dass sie auf jeden Fall auch nach dem Flug funktionieren. Dazu gehörte bspw. der GPS-Logger, ein solcher wird sogar in der Genehmigung durch das Luftfahrtbundesamt gefordert. Ein weiteres System, welches unabdingbar ist, ist der GPS-Tracker, also ein Gerät, welches uns laufend über den Standort der Sonde auf dem Laufenden hielt. Sollte dieser ausfallen oder im Nachhinein keine Netzabdeckung an der Landestelle haben bestehen, wäre es unwahrscheinlich gewesen, dass wir die Sonde jemals wiederfinden würden. Beim zweiten Flug wurde der bereits bestehende GPS Tracker, um einen zweiten selbstgebauten Tracker ergänzt mit einer spezielle SIM-Karte, die in Deutschland das Netz aller Anbieter verwenden kann. Dies brachte uns den Vorteil, dass wir unabhängig von einem bestimmten Anbieter waren und eine höhere Wahrscheinlichkeit bestand, dass wir an der Stelle, an der die Sonde landen würde Empfang hätten.

Um die einzelnen Sensordaten zu speichern, wurden insgesamt drei Arduino Nanos mit jeweils einem SD-Karten Modul verwendet, um nicht bei dem Aussetzen eines Moduls einen kompletten Datenverlust zu erleiden. Das erste Modul speicherte die Daten des Accelerometers (Sensorbezeichnung: LSM303DLHC) und die Temperatur und Luftfeuchte (DHT22) innerhalb der Sonde. Das Zweite war für Temperatur, Luftfeuchte, Druck (bme280) und UV Intensität (ML8511) außerhalb der Sonde zuständig. Das dritte Modul war ausschließlich für das Speichern der GPS-Daten (NEO-6M) zuständig. Beim zweiten Flug wurde der NEO-6M durch den BM-220 ersetzt, da das GPS-Modul beim ersten Flug ab einer Höhe von 13 km nicht mehr gearbeitet hat. Für alle drei Module wurde eine eigene Platine gelötet, um sicherzugehen, dass sich während des Fluges keine Kabel o.ä. lösen, welche für den zweiten Flug um ein Echtzeitmodul ergänzt wurde, um eine besser Vergleichbarkeit der Daten zu gewährleisten. Schließlich installierten wir noch zwei Kameras (Vorder- und Rückansicht), die wir beim zweiten Flug außerdem um eine weitere Kamera, welche vertikal nach oben gerichtet war, ergänzten.

Um sicherstellen zu können, dass alle Systeme auch unter schwierigsten Bedingungen funktionieren, haben wir im Vorfeld einige Tests durchgeführt. Vor dem ersten Flug haben wir die Sonde z.B. für mehrere Stunden in den Gefrierschrank gestellt oder haben alles heftig durchgeschüttelt und herumgeschleudert. Vor dem zweiten Start haben wir nur noch das Verhalten der der Tracker beim Verlieren vom Mobilfunknetz und dann das erneute Aufbauen einer Verbindung getestet und einige mehrstündige Ausdauer tests gemacht.

Um die rechtlichen Voraussetzungen zu erfüllen, benötigten wir die Erlaubnis, einen Wetterballon starten lassen zu dürfen. Voraussetzung dafür, war der Abschluss einer speziellen Versicherung, die für mögliche Schäden aufkommt, die Erlaubnis des Grundstückseigentümers des Start-Platzes, sowie eine Datenschutzerklärung. Daneben war bspw. noch gefordert, dass die Verbindungsseile der Sonde zum Ballon eine Reißfestigkeit von 150N haben musste und dass nur bei guten Sichtverhältnissen gestartet werden darf. Nach der Genehmigung durch die Landesluftfahrtbehörde, ist schließlich noch bei der Deutschen Flugsicherung eine Flugverkehrskontrollfreigabe zu beantragen. Letztere war aber an dem von uns gewählten Standort nicht notwendig, da dieser nicht in der Nähe eines Flughafens lag.

Weil man nicht genau voraussagen kann, wo die Sonde landen würde, hatten wir uns auf jede Eventualität vorbereitet. Zum Bergen der Sonde hatten wir zwei Leitern, eine Teleskopstange mit Zugschere, zwei Seile, viel Werkzeug und vor allem Proviant dabei. Für den Fall, dass wir die Position der Sonde nicht genau bestimmen könnten, packten wir auch noch unsere Drohne ein, um später einfacher großflächig suchen zu können. Am Abend vorher wurden die Sonden ein letztes Mal gewogen, um die Flugroute und die benötigte Heliummenge zu bestimmen. Nach einem letzten Funktionalitätstest am Morgen verschlossen wir vor dem Start die Sonde mit viel Klebeband und füllten den Ballon mit Helium. Als dieser mit der richtigen Menge an Gas gefüllt war, verschlossen wir den Ballon mit Kabelbindern und verbanden ihn mit dem Fallschirm und der Sonde. Schließlich ließen wir den Wetterballon starten.



Abbildung 2 Sonde von außen

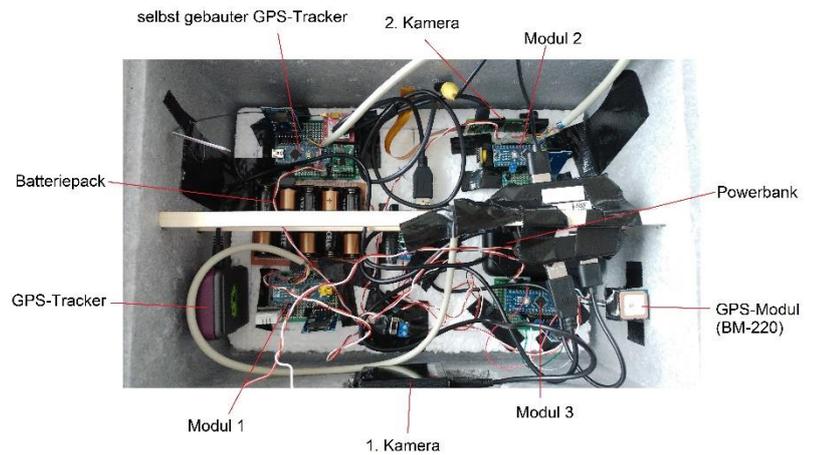


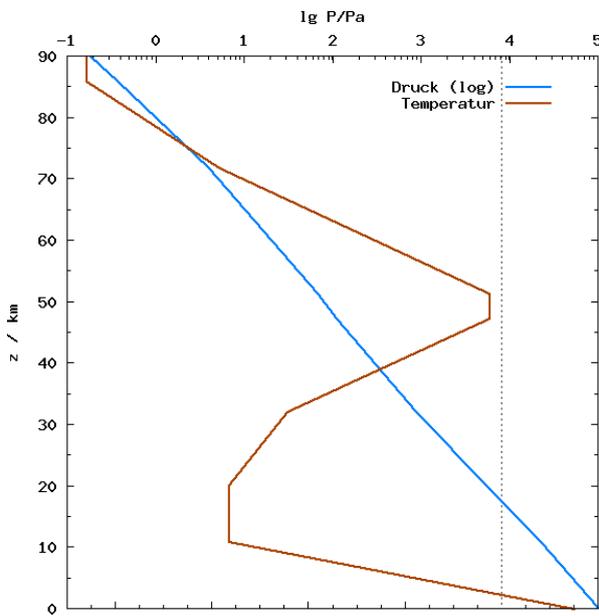
Abbildung 3 Sonden Aufbau mit Beschreibung

### 3. Hypothese

Im Folgenden werde ich einige Hypothesen formulieren bzgl. der voraussichtlichen Messergebnisse der Temperatur-, Luftdruck und Beschleunigungssensoren. Daneben werde ich einige Aussagen über Flugzeit und Landeort treffen.

#### Temperatur

Der Verlauf der Temperatur und des Luftdrucks ist von sehr vielen Faktoren abhängig. Um in verschiedenen Bereichen aber trotzdem damit arbeiten zu können, wurde für den Verlauf von Temperatur und Luftdruck mit zunehmender Höhe ein standardisiertes Modell erstellt. Die so genannte Normatmosphäre beschreibt in 300m Abständen die Änderung von Temperatur und Luftdruck. (Grundannahmen: Druck von 1013,25 hPa, Temperatur von 15°C). Dieses Modell entspricht ungefähr dem Aufbau der Atmosphäre über 40°nördlicher Breite:



Gezeigt ist hier der Temperatur und Druckverlauf bei zunehmender Höhe. Das Temperaturminimum liegt hier bei ca. 11 km in der so genannten Tropopause, dem Übergang zur Stratosphäre. Das Temperaturmaximum bei ca. 50km ist die Stratopause, welche der Übergang zur Mesosphäre ist. Bei dem Flug erwarte ich auf jeden Fall die Tropopause in den Daten zu sehen, also ein Absinken der Temperatur auf ein Minimum und eine anschließende Temperaturzunahme, sobald die Sonde in der Stratosphäre ist.

Abbildung 4 :US-Standardatmosphäre 1976(Quelle[1])

#### Luftdruck

Eine weitere Methode zur Beschreibung des Drucks in zunehmender Höhe ist die Barometrische Höhenformel.

Dafür betrachtet man ein bestimmtes Würfelvolumen, welcher eine Grundfläche A und eine Höhe dh besitzt. Auf diesen Volumenkörper wirkt zum einen die Kraft der darüber liegenden Luft ( $p \cdot A$ ) und auf die Grundfläche wirkt zusätzlich noch die Gewichtskraft der Luft im Würfel plus der Luftdruck durch den Würfel. (Luftdruck des Würfels + Dichte der Luft \* Erdbeschleunigung \* Volumen =  $dp + \rho \cdot g \cdot (dh \cdot A)$ ). Entgegengesetzt zu den beiden Kräften wirkt ein Druck(Kraft) in entgegengesetzte Richtung ( $p \cdot A$ ).

Nun wird vorausgesetzt, dass es keine Luftströmungen gibt. Das heißt, dass von außen keine Kraft auf das System wirkt und ein Gleichgewicht herrscht. Wir nehmen also an, dass die Summe der Kräfte gleich Null sind.

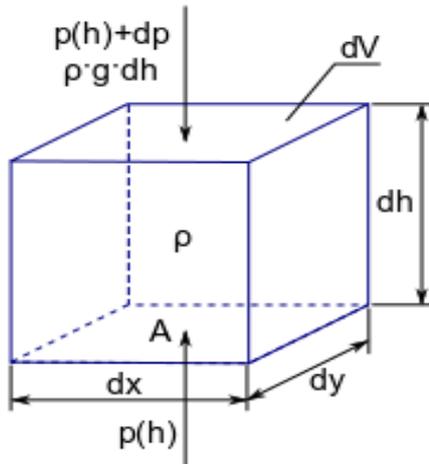


Abbildung 5: Volumenelement mit den maßgebenden Einflüssen

$$\rho \cdot A \cdot g \cdot dh \cdot A - (p + dp) \cdot A = 0$$

$$\Leftrightarrow \frac{dp}{dh} = -\rho \cdot g \text{ für die Dichte kann man } \rho = \frac{p \cdot M}{R \cdot T} \text{ einsetzen.}$$

$$\Leftrightarrow \frac{dp}{dh} = -\frac{p \cdot M \cdot g}{R \cdot T}$$

Wobei  $M$  = mittlere Masse des Atmosphärgases;  $g$  = Erdbeschleunigung;  $R$  = universelle Gaskonstante und  $T$  = Absolute Temperatur sind.

Um eine Beziehung zwischen der Druckänderung  $dp$  und der Höhenänderung herzustellen werden die beiden Größen "getrennt":

$$\Rightarrow \frac{dp}{p} = \frac{M \cdot g}{R \cdot T} \cdot dh$$

Anschließend werden beide Seiten integriert:

$$\Rightarrow \int_{p(h_0)}^{p(h_1)} \frac{dp}{p} = - \int_{h_0}^{h_1} \frac{M \cdot g}{R \cdot T} dh$$

Integration der linken Seite:  $\ln\left(\frac{p(h_1)}{p(h_0)}\right)$

Um die rechte Seite zu integrieren, müsste die Höhenabhängigkeit von  $g$  und  $T$  bekannt sein. Man kann aber zur Vereinfachung annehmen, dass  $g$  und  $T$  konstant seien. Wie groß der Einfluss auf das Ergebnis durch die Näherung ist, wird sich später zeigen. Nun kann man die vorherige Formel in eine e-Funktion umformen, mit welcher wir uns den Abfall des Drucks mit steigender Höhe darstellen lassen können.

$$p(h_1) = p(h_0) \cdot e^{-\frac{M \cdot g}{R \cdot T} \cdot dh} \text{ (Quelle [3])}$$

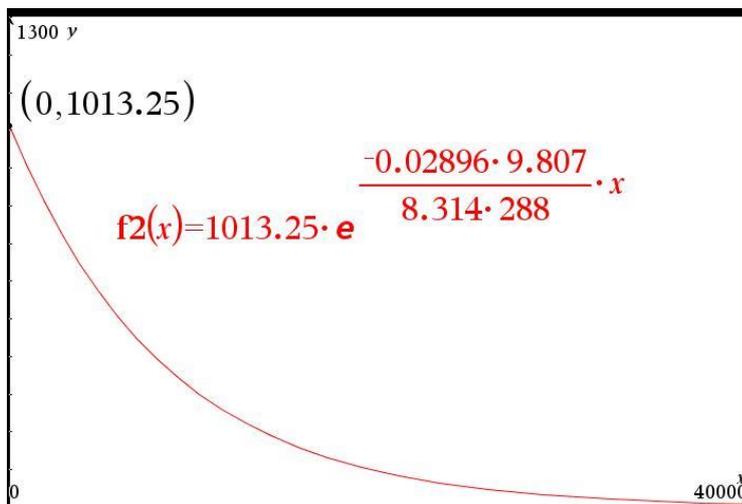


Abbildung 6 : Theoretischer Druckabfall berechnet mit der Barometrischen Höhen Formel

Ich gehe davon aus, dass der Druckabfall später auch als exponentielle Abnahme beschrieben werden kann.

## Flugweite

Die Vorberechnung von Flugroute und Landeort sind vor allem sehr wichtig, um im Vorhinein die Gefahr einer Landung in einem See oder in einem dicht besiedelten Gebietes zu minimieren. zum Bestimmen der Flugroute wurde der online "CUSF Landing Predictor" (Quelle[4]) verwendet. Dafür benötigt die Webseite neben Angaben über den Startort und Uhrzeit, die Aufstiegs- und Sinkgeschwindigkeit und die Platzhöhe des Ballons. Die Platzhöhe wurde mit dem in der Seite integrierten Rechner zur Berechnung der Höhe berechnet.

Neben der berechneten Platzhöhe bekommt man außerdem die Menge an Helium ausgegeben, um die gewünschte Aufstiegs geschwindigkeit zu erreichen. Eine zu geringe Menge Helium sorgt dafür, dass der Ballon langsamer und höher aufsteigt, somit länger unterwegs ist und weiterfliegen kann. Wir entschieden uns also tendenziell bei beiden Flügen dazu, etwas weniger als die angegebene Menge in den Ballon zu füllen.

Hierbei mussten wir allerdings noch unsere maximale Akkulaufzeit im Auge behalten. In unseren Tests hatte sich herausgestellt, dass die Systeme in der Sonde nur maximal vier bis viereinhalb Stunden ohne Probleme laufen können, in welche die Bergungsdauer noch mit eingerechnet werden muss. Wir versuchten also einen Kompromiss zwischen Flughöhe, Flugdauer und Akkukapazität finden. Beide Flüge legten wir also auf eine ungefähre Dauer von zweieinhalb Stunden und eine Platzhöhe von knapp über 30 km aus.

## Beschleunigung

Eine weitere Größe, die wir während des Fluges erfassen, ist die Beschleunigung, welche auf die Sonde wirkt. Zu erwarten ist, dass man den Einfluss des Auftriebes des Ballons sehen kann, dass also nach einer Beschleunigungsphase die Aufstiegs geschwindigkeit weitestgehend konstant bleibt. Des Weiteren vermute ich, dass nach dem Platzen der Ballonhülle für einen kurzen Moment Schwerelosigkeit gegeben ist (vgl. Parabelflug). Danach erwarte ich eine starke positive Beschleunigung aufgrund der Bremswirkung des Fallschirms. Daraufhin wird sich vermutlich wieder eine konstante Sinkgeschwindigkeit einstellen.

# 4. Durchführung

Der erste Flug startete am 12. Oktober 2019 ohne Probleme. Nach dem Start flog der Ballon in Richtung Osten und war nach wenigen Sekunden nicht mehr zu sehen. Ohne Zeit zu verlieren, machten wir uns sogleich auf den Weg in Richtung des vorausberechneten Landeorts. Wir sollten bis dorthin ca. 4 Stunden brauchen. Etwa drei Stunden nach dem Start erhielten wir schließlich vom GPS-Tracker die aktuelle Position, welche ca. 20 km vom berechneten Landeort entfernt lag. Wir erreichten die Sonde etwa 4,5 Stunden nach dem Start. Die Sonde war auf einer Lichtung mitten in einem hohen Tannenwald gelandet, sodass wir sie ohne Probleme sie vom Boden aufheben und zum Auto zurückkehren konnten. Die Messergebnisse sind im nächsten Abschnitt aufgeführt.

(Impressionen vom Start und Flug: siehe Anhang)

Den zweiten Ballon haben wir am 18.03.2020 starten lassen. Das Wetter an dem Tag war nicht optimal, doch das genehmigte Zeitfenster zum Starten neigte sich dem Ende zu. Deswegen entschieden wir uns, trotz des nicht optimalen Wetters zu fliegen. Der Start verlief wieder ohne Probleme und aufgrund geringeren Windes dauerte es länger als beim ersten Flug, bis der Ballon aus unserem Blickfeld verschwand. Da der vorausberechnete Landeplatz nur ca. 50 km vom Startplatz entfernt war, mussten wir uns nicht so sehr beeilen. Wir erreichten die Zielregion nach einer ca. 40-minütigen Autofahrt. Unerwartet bekamen wir schon 2 Stunden nach dem Flug GPS-Koordinaten vom Tracker. Die Position der Sonde war ca. 15 km von uns entfernt. Dieses Mal landete die Sonde mitten in einem Wald und hing am Fallschirm genau einen Meter über einem kleinen Bach. Zuerst sicherten wir die Daten der Sonde und versuchten daraufhin vergeblich, den Fallschirm aus dem Gestrüpp des Baumes zu befreien. Schließlich mussten wir ihn aber im Wald zurücklassen. (Impressionen vom Start und Flug siehe Anhang)

## 5. Messungen

### Erster Flug

Flugweite: ca. 220 km

Flugzeit: 2 h und 53 min

maximal gemessene Höhe 13.000 m (GPS-Modul hat versagt)

tiefste gemessene Temperatur: -44,08°C

tiefste gemessene Luftfeuchtigkeit: 0,84%

niedrigster gemessener Luftdruck: 9,23 hPa

Im Folgenden findet sich einige Darstellungen über den Verlauf des Fluges:

Flugroute:

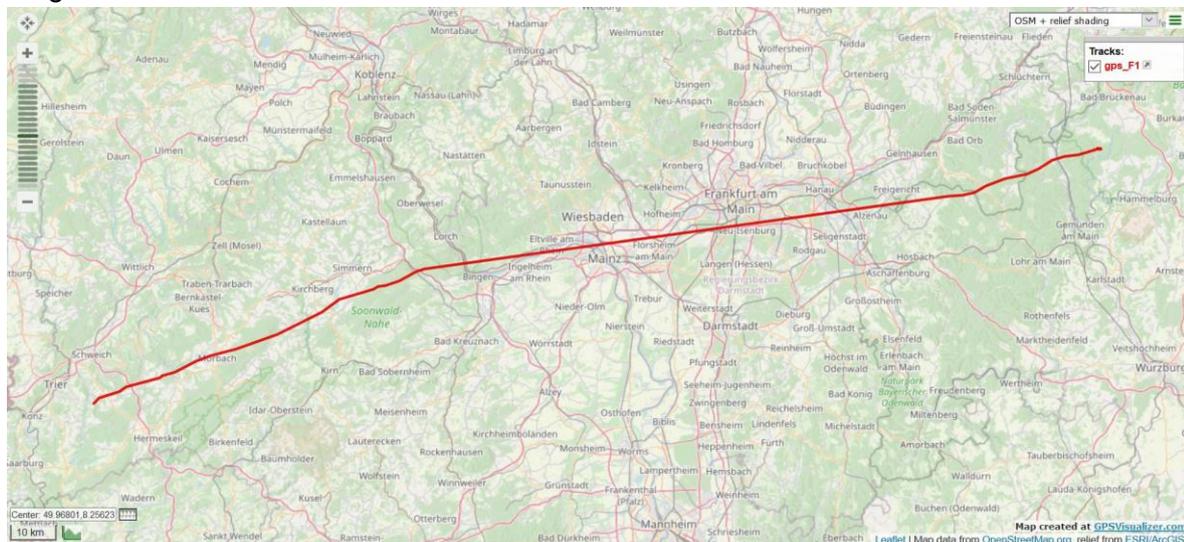


Abbildung 7: Flugroute Flug Nr.:1

Höhe und Geschwindigkeit des GPS Moduls / Luftdruck, -feuchte und Temperatur außerhalb der Sonde:

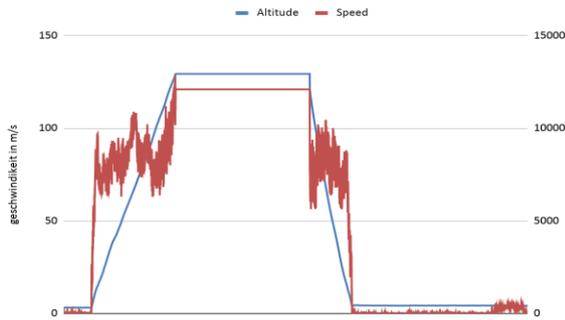


Abbildung 8 Höhe u. Geschwindigkeit Flug Nr.:1

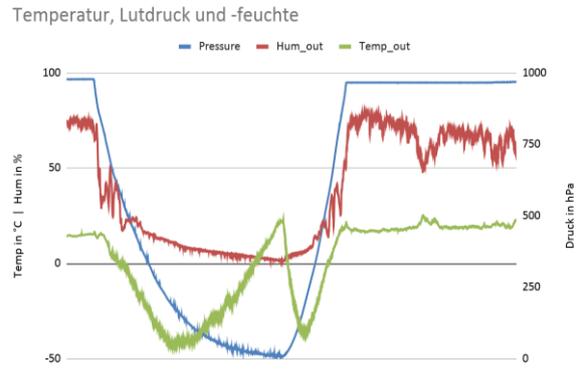


Abbildung 9 Temperatur, Luftdruck u. Luftfeuchte Flug Nr.:1

UV-Intensität / Beschleunigung der Sonde:

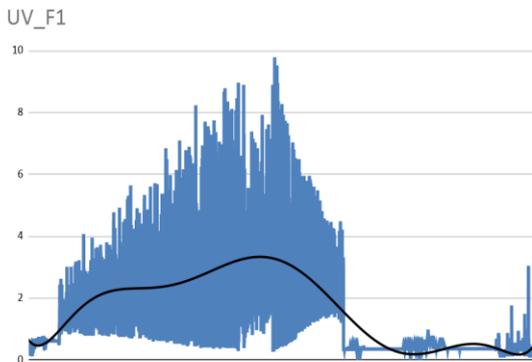


Abbildung 10 UV-Intensität Flug Nr.:1

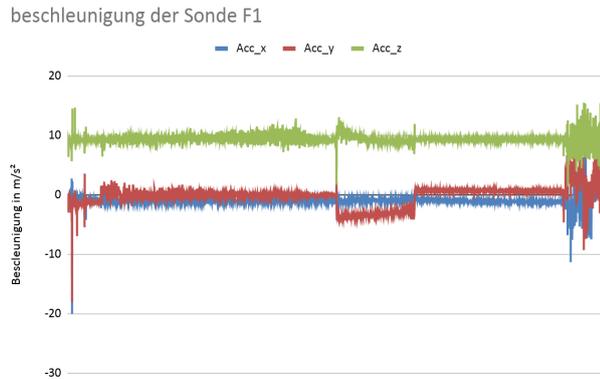


Abbildung 11 Beschleunigung der Sonde Flug Nr.:1

# Zweiter Flug

Flugweite: ca. 37 km

Flugzeit: 1 h und 58 min

maximal gemessene Höhe: 12100,8 m (GPS-Modul hat versagt)

tiefste gemessene Temperatur: -43,98°C

tiefste gemessene Luftfeuchtigkeit: 1,62%

niedrigster gemessener Luftdruck: 69,43 hPa

Flugroute (rot= Vorausberechnung , Blau= tatsächliche Flugroute)



Abbildung 12 Flugroute Flug Nr.:2

Höhe und geschwindigkeit Flug 2

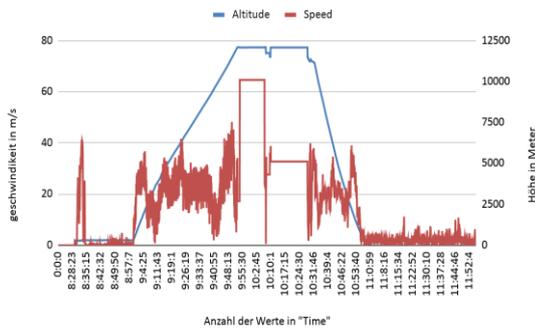


Abbildung 13 Höhe u. Geschwindigkeit Flug Nr.:2

Temperatur, Luftdruck und - feuchte außerhalb der Sonde

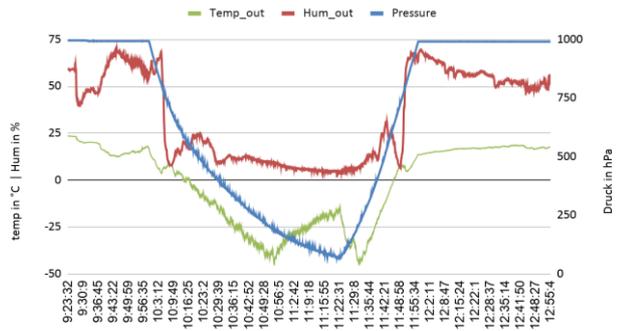


Abbildung 14 Temperatur, Luftdruck u. Luftfeuchte Flug Nr.:2

UV-Intensity\_F2

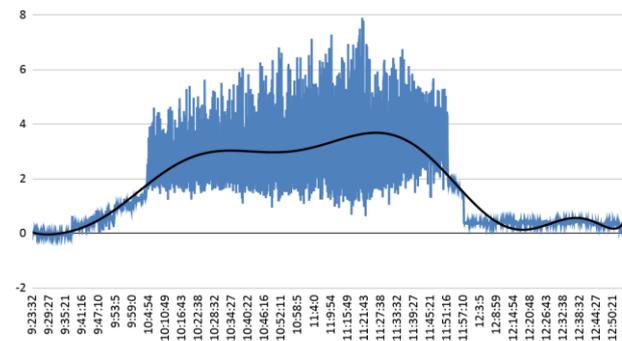


Abbildung 15 UV-Intensität Flug Nr.:2

Acc\_x Acc\_y Acc\_z

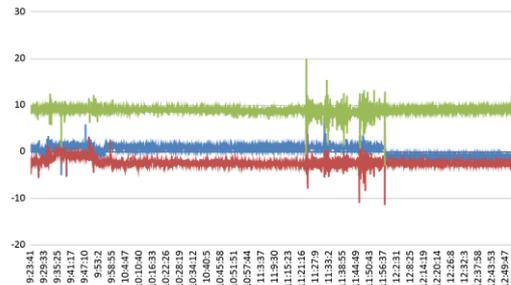


Abbildung 16 Beschleunigung der Sonde Flug Nr.:2

## 6. Auswertung

### Temperatur

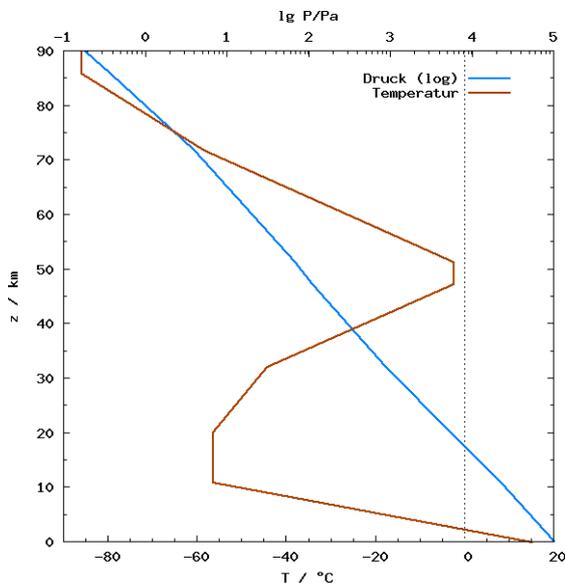


Abbildung 3: US-Standardatmosphäre 1976(Quelle [1])

Zur Verdeutlichung des Temperaturverlaufs haben wir uns das Modell der sogenannten Normatmosphäre angeschaut. In diesem Modell wird bis zu einer Höhe von 10 km ein starker Temperaturabfall beschrieben: der im Modell dargestellte Wert liegt bei ca. -55 $^{\circ}\text{C}$  (Tropopause). Darauf folgt eine Phase, in der die Temperatur bis zu einer Höhe von 20 km konstant bleibt. Ab 20 km bis ca. 50 km sinkt dann die Temperatur wieder. Aus den Daten der beiden Flüge können wir gut ablesen, dass wie im Modell ein Temperaturabfall mit ihrem minimalsten Wert um 10 km Höhe gegeben war.

Was aber bei beiden Flügen auf die tiefste Temperatur folgt, ist wieder ein Anstieg der Temperatur, beim ersten Flug auf bis zu 24 $^{\circ}\text{C}$  und beim zweiten nur auf -15 $^{\circ}\text{C}$ . Die beiden

Werte können jedoch nicht so einfach miteinander verglichen werden, da wir beim zweiten Flug nicht die gleiche Höhe erreicht haben wie beim ersten Flug. Allgemein lässt sich sagen, dass es einen Temperaturanstieg gibt, aber die von mir gemessenen Daten viel höher ausfallen, als die Angaben des Modells.

Eine allgemeine Aussage über die Richtigkeit des Modells kann man aber mit diesen zwei Flügen kaum treffen. Modelle sind dafür gedacht, Vorgänge zu vereinfachen, sodass ein Modell überall ungefähr anwendbar ist. Modelle, die sich mit Wetterphänomenen beschäftigen, sind häufig fehleranfällig, da das gesamte Phänomen Wetter ein chaotisches System ist und um dieses zu vereinfachen, müssen viele Kompromisse eingegangen werden.

Eine weitere Ursache für die Abweichung kann auch in der Lage des Temperatursensors zu finden sein. Der Sensor wurde mittig auf der Oberseite der Sonde angebracht, was uns den Vorteil brachte, dass Feuchtigkeit oder Wasser beim Landen nicht direkt auf die Kontakte des Sensors trifft. Dafür mussten wir aber damit rechnen, dass unsere Daten nicht hundertprozentig aussagekräftig sind, da der Einfluss von Sonnenstrahlen die Daten verfälschen können.

# Druck

Zur Beschreibung des Druckabfalls mit zunehmender Höhe habe ich die Barometrische Höhenformel verwendet. Mit der angenommenen Vereinfachung sah der prognostizierte Druckabfall so aus:

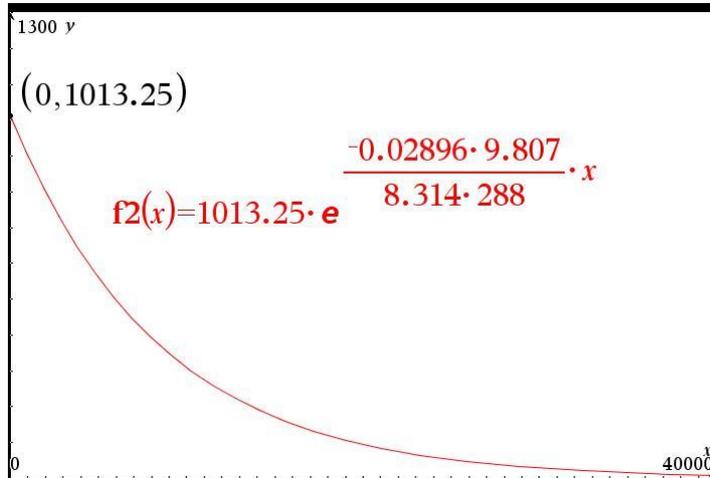


Abbildung 5: Theoretischer Druckabfall berechnet mit der Barometrischen Höhen Formel

Die Messungen zeigten einen exponentiellen Druckabfall. Doch ist in der oberen Grafik der Druck in Bezug auf die Höhe abgetragen. Meine Messungen zeigen dagegen den Druck in Verbindung mit der Zeit. Ich habe versucht, den gemessenen Druck mit den gemessenen Höhen, soweit die Daten vorhanden sind, zu kombinieren. Doch ist dies nicht möglich in der Form, wie ich die Daten vorliegen habe. Daher ist ein direktes Vergleichen schwierig, weshalb ich keine fundierte Aussage

über die Genauigkeit der von mir verwendeten barometrischen Höhenformel machen. Dennoch lässt sich sagen, dass der gemessene Druckabfall als exponentielle Abnahme beschrieben werden kann, (Abb. 17) was der Druckabnahme entspricht, welche durch die barometrische Höhenformel beschrieben wird.

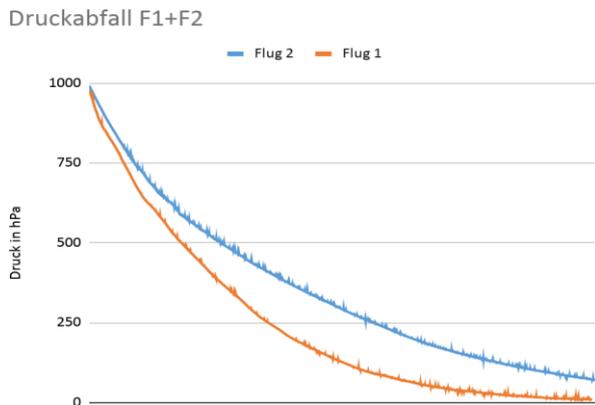


Abbildung 17: Tatsächlicher Druckabfall

# Beschleunigung

Während den Flügen haben wir die gesamte Beschleunigung auf die Sonde in x, y und z Richtung gemessen.

beschleunigung der Sonde F1

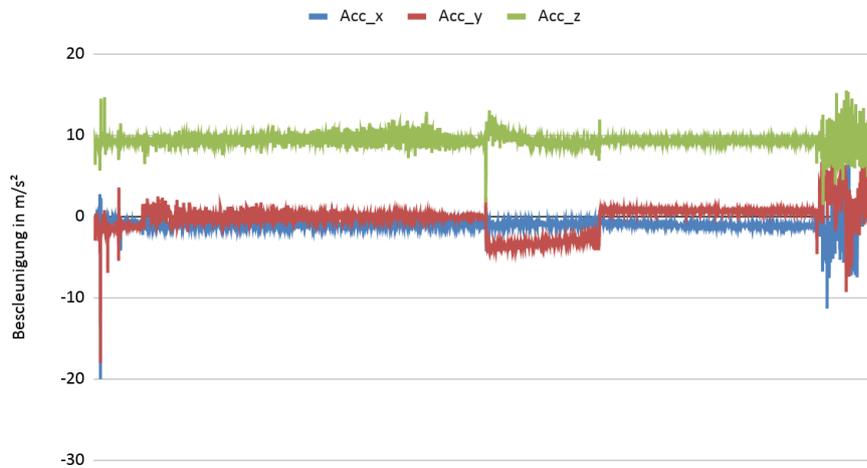


Abbildung 10 Beschleunigung der Sonde Flug Nr.:1

Abbildung 10 zeigt die Beschleunigung der Sonde während des gesamten Fluges. Zu beachten ist hier, dass das auch die Erdbeschleunigung vom Sensor mitgemessen wurde. Trotzdem lässt sich ein sehr markanter Punkt feststellen: An der Stelle, an der der Ballon geplatzt ist, geht die Beschleunigung auf null, da zu diesem Zeitpunkt Schwerelosigkeit herrschte. Daraufhin erfolgt ein verhältnismäßig starker Anstieg der Beschleunigung, als sich nämlich der Fallschirm entfaltet und beginnt, den Fall der Sonde abzubremsen. Wenn man die Filmaufnahmen zum Zeitpunkt des Platzens des Ballons betrachtet, sieht man, dass die Sonde leicht in Schräglage kommt, weil die Schnüre der Befestigung verrutscht sind. Dies erklärt die Beschleunigungsänderung in y-Richtung. Ein weiterer markanter Punkt ist die Landestelle. Diese sieht man vor allem in der Beschleunigungsänderung der y-Richtung.

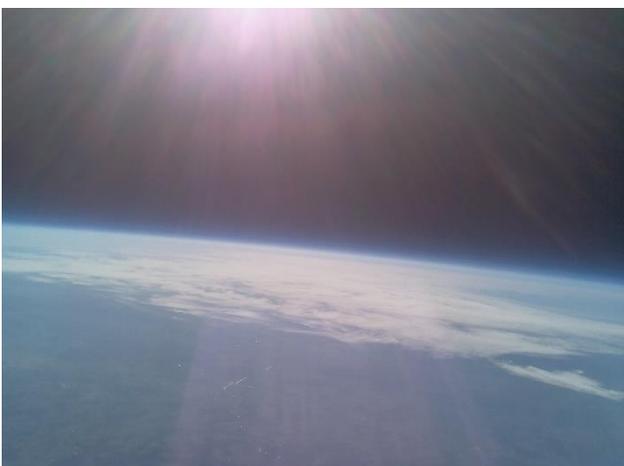


Abbildung 18 Kamera blick vor dem Platzen Flug Nr.:1



Abbildung 19 Kamera blick nach dem Platzen Flug Nr.:1

### Beschleunigung der Sonde F2

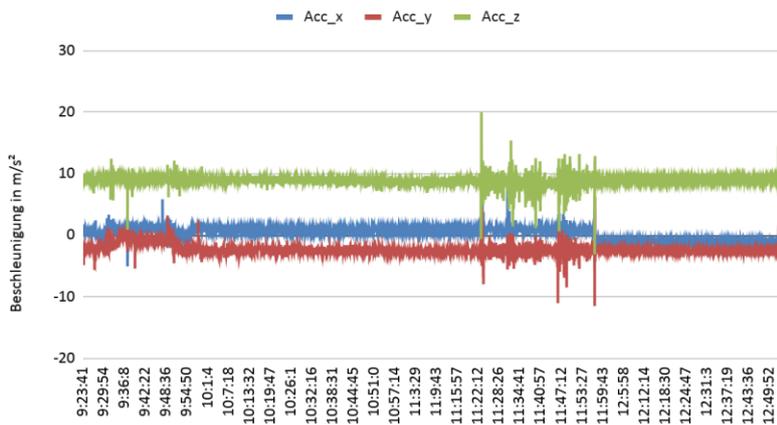


Abbildung 15 Beschleunigung der Sonde Flug Nr.:2

Im Gegensatz zum ersten Flug gibt es hier eine viel größere Beschleunigungsänderung. Bis zum Zeitpunkt des Platzens sind die Verläufe ähnlich, doch beim zweiten Flug gibt es immer wieder starke Schwankungen in der Sinkgeschwindigkeit. Dies liegt daran, dass beim ersten Flug der Ballon in viele kleine Teile zerfetzt wurde. Beim zweiten Flug hingegen hing die Ballonhülle noch komplett am Fallschirm, was zur Folge hatte, dass der Fallschirm sich nicht ganz entfalten konnte bzw. wenn er es geschafft hatte wieder zusammen fiel aufgrund des Gewichts des Ballons.



Abbildung 20: Die Reste des Ballons haben sich um das Seil gewickelt und hindern den Fallschirm, sich komplett auszubreiten

## 7. Schätzung der Flughöhe

Die Höhenmessungen bei diesen Flügen basierten auf GPS. Die GPS-Module haben intern Limitierungen, damit sie nicht für militärische Zwecke (wie z.B. Lenkraketen) missbraucht werden können. Beim normalen Gebrauch zur Standortbestimmung auf der Erde hat dies keine Auswirkungen, bei Wetterballons hingegen können solche Limitierungen jedoch sehr ärgerlich sein.

Das Modul schaltet für eine gewisse Zeit ab, sobald zwei folgenden Punkte zutreffen: Höhe > 50.000 m, Geschwindigkeit > 500 m/s, Beschleunigung > 4g. Dies geschieht auch, wenn eine Überschreitung der Limits zeitlich versetzt vorkommt. Um aber ein Hardware-Versagen auszuschließen, haben wir beim zweiten Flug das GPS-Modul zu BM-220 gewechselt, allerdings haben wir auch mit dem neuen Modul die Limitierungen überschritten. Wenn man sich die Grafik mit den Daten des GPS-Moduls anschaut, sieht man, dass für beide zu den Zeitpunkten des Ausfalls ein deutlicher Geschwindigkeits- und Beschleunigungsausschlag angezeigt wird. Dies kann bspw. durch eine starke Windböe verursacht worden sein oder aber auch durch einen Messfehler seitens des GPS-Moduls. Dass die Limitierung der Höhe überschritten wurde, ist dagegen sehr unwahrscheinlich. Ein Überschreiten der maximalen Beschleunigung bleibt da als letzte Option.

Es lässt sich nur spekulieren, was der Grund der Ausfälle war. Doch eine Frage bleibt: Wie hoch ist denn der Ballon geflogen? Um dies zu bestimmen, verwende ich zwei Methoden, mit denen ich näherungsweise die Höhe des Platzpunktes bestimmen möchte.

### Fall- / Sinkgeschwindigkeit

Im Folgenden werde ich versuchen, mit Hilfe der Steig- und Sinkgeschwindigkeit die maximale Höhe des Ballons zu bestimmen. Meine Grund Annahme ist, dass dies als lineare Funktion darstellbar ist.

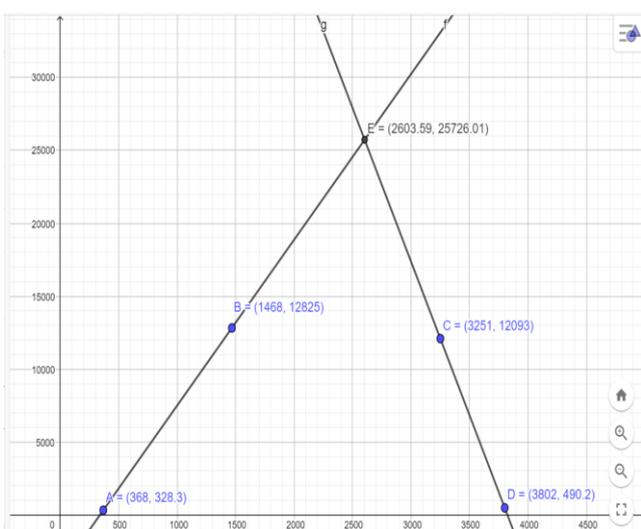


Abbildung 21 Schätzung der Flughöhe mit Hilfe der Fall- / Sinkgeschwindigkeiten für Flug Nr. 1

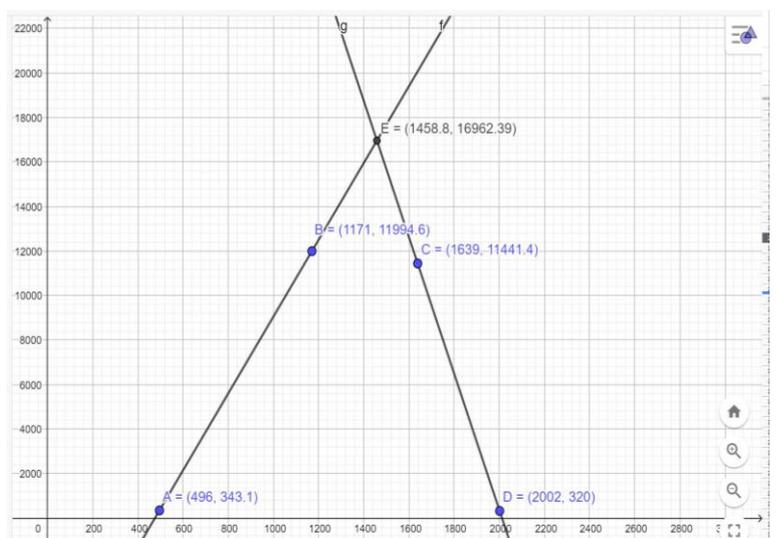


Abbildung 22 Schätzung der Flughöhe mit Hilfe der Fall- / Sinkgeschwindigkeit für Flug Nr.:2

Zur Darstellung der Geraden f habe ich mir jeweils Punkte kurz nach dem Start gewählt und den letzten validen Punkt der GPS-Module. Für die Gerade g habe ich den ersten validen Punkt, nachdem die GPS-Tracker wieder funktioniert haben, genommen und als zweites einen Punkt kurz bevor die Sonde gelandet ist. Die Stelle, an der sich die beiden Graphen schneiden, ist die theoretische Platzhöhe des Ballons. Der beschreibende Parameter ist dabei der y-Wert. Bei Flug eins wäre das 25.726,01m (Abb.21) bei Flug Nr. 2 wären es 16.962,39m (Abb.22)

## Druckkurve

Wir haben uns schon den Druckabfall angeschaut, den wir mit Hilfe der Barometrischen Höhenformel ausgewertet haben. Ich bin bei der Hypothese von ca. 15°C (288°K) als Startwert, einem Ausgangsdruck von 1013,25 hPa und einer konstanten Erdbeschleunigung ausgegangen zur Berechnung der Druck Abnahme.

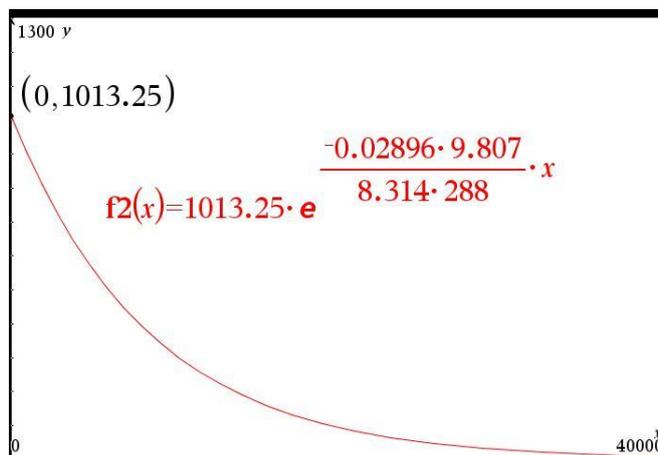


Abbildung 6: Schätzung der Flughöhe mit Hilfe der Fall- / Sinkgeschwindigkeit für Flug Nr.:1

Da ich aber die Messwerte für Temperatur und Druck beim Start haben, können wir diese als Grundlage unserer Berechnung verwenden. Um nun herauszufinden, wie hoch der Ballon geflogen ist, haben ich den tiefsten gemessenen Druck der Flüge genommen und für diesen Wert eine Gerade eingezeichnet (f(x)= tiefster gemessener Druck). Abweichungen zur tatsächlichen Höhe können zum einen durch die Annahme einer konstanten Erdbeschleunigung kommen, zum anderen kann es zum tatsächlichen Druck

in der Höhe Abweichungen geben, da der von mir eingesetzte Sensor nur für einen Minimaldruck von etwa 300 hPa ausgelegt war, d.h. die Werte < 300 hPa sind vermutlich nicht sehr präzise.

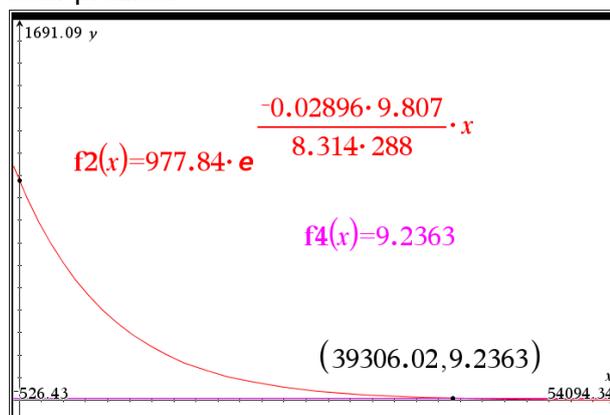


Abbildung 21: Abschätzung der Flughöhe Flug Nr.:1 mit Hilfe der Barometrischen Höhenformel

In der Abbildung 23 sehen wir in Rot den Druckabfall, der mit Hilfe der Barometrischen Höhenformel und mit den während des Starts herrschenden Bedingungen berechnet wurde. (15°C = 288°K ; 977,84 hPa) In Rosa wurde eine Gerade parallel zur x-Achse eingezeichnet, mit dem y-Wert von 9,2363 hPa: dieser Wert entspricht dem tiefsten gemessenen Luftdruck. An dem Punkt an dem sich die beiden Graphen schneiden, entspricht der x-Wert der theoretischen Flughöhe des Ballons. Diese soll laut Berechnung bei 39.306,02 m liegen.

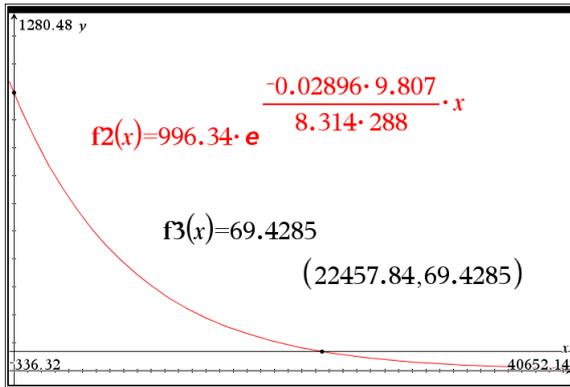


Abbildung 22 Abschätzung der Flughöhe Flug 2 mit Hilfe der Barometrischen Höhenformel

In Abbildung 24 sehen wir wie in der vorherigen Abbildung in Rot den Druckabfall, der mit Hilfe der Barometrischen Höhenformel und mit den während des Starts herrschenden Bedingungen berechnet wurde. (15°C = 228°K ; 996,34 hPa) In Schwarz wurde eine Gerade parallel zur x-Achse eingezeichnet mit dem y-Wert von 69.4285 hPa. Dieser Wert entspricht dem tiefsten gemessenen Luftdruck. An dem Punkt, an dem sich die beiden Graphen schneiden, entspricht der x-Wert der theoretischen Flughöhe des Ballons. Diese liegt laut Berechnung bei 22.457,84 Metern.

## Auswertung Flughöhen Bestimmung:

Die beiden Methoden können nur einen gewissen Richtwert geben. Ohne die genauen Höhendaten kann man keine genauere Aussage treffen. Es findet sich leider auch keine Möglichkeit zu untersuchen, ob die eine Methode z.B. einen maximalen Höchstwert angibt. Das was ich habe, sind zwei Werte die stimmen können oder nicht. Beim ersten Flug liegen die beiden Methoden im Ergebnis ca. 13,5km auseinander. Daraus kann man schließen, dass der Ballon irgendwo in diesem Bereich unterwegs war. Beim zweiten Flug liegen die beiden Methoden ca. 5,5km auseinander, was eine allgemeine Einschätzung schon eher zulässt als beim ersten Flug. Doch Gewissheit gibt es auch hier nicht.

## 8. Andere Messdaten

### UV-Sensor

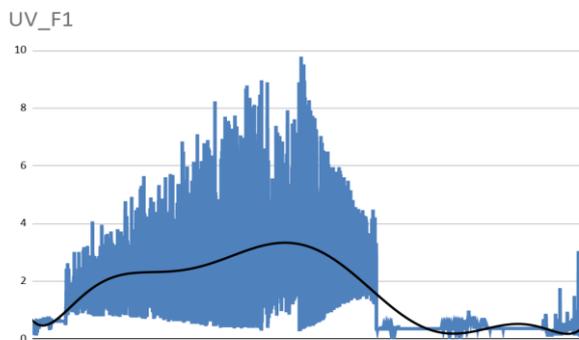


Abbildung 9 UV-Intensität Flug Nr.:1

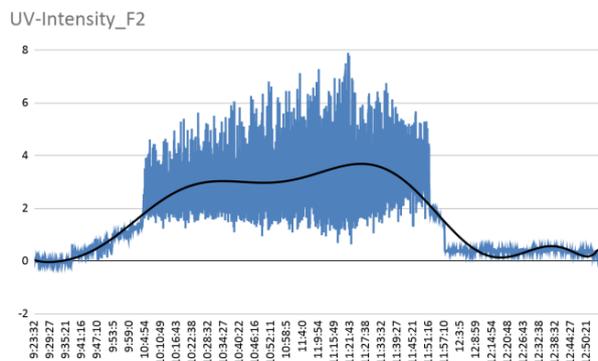


Abbildung 15 UV-Intensität Flug Nr.:2

Die Messdaten des UV-sensors sind sehr verrauscht, mit Hilfe einer Trendlinie lassen sich aber gewisse Muster erkennen. Ein möglicher Grund für die verrauschten Daten könnte der Befestigungsort des Sensors sein.

Diesen haben wir mittig auf der Oberseite der Sonde platziert. Da sich die Sonde unter dem Ballon aber andauernd hin und her bewegte, ist davon auszugehen, dass der Sensor dadurch regelmäßig im Schatten des Ballons war und so dann nur wenig UV-Strahlung abbekommen hat.

Trotzdem kann man an der Trendlinie einen sehr markanten Punkt erkennen. So entspricht der Punkt mit der höchsten UV-Intensität auch dem Punkt, an dem der Ballon ungefähr geplatzt ist. Ein weiterer sehr markanter Punkt sind die Wendestellen der Trendlinien, in den Rohdaten sehr gut zu sehen als sprunghafter Anstieg der UV-Strahlung. Dieser Punkt entspricht ungefähr dem Zeitpunkt, an dem die Sonde durch die Wolken geflogen ist. Da beide Diagramme eine Art Sattelpunkt der UV-Intensität auf etwa der Hälfte der Reise gemessen haben, kann davon ausgegangen werden, dass wir zu diesem Zeitpunkt in die Ozonschicht eingedrungen sind. Ob wir sie auch komplett durchquert haben, lässt sich jedoch aus diesen Daten nicht zweifelsfrei bestimmen.

## Luftfeuchtigkeit

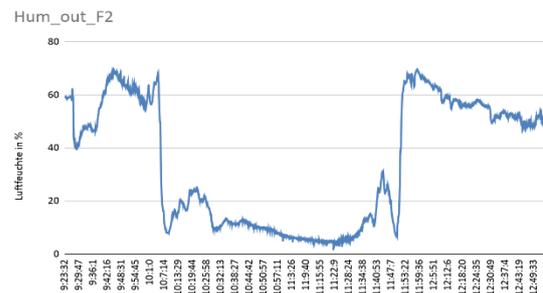
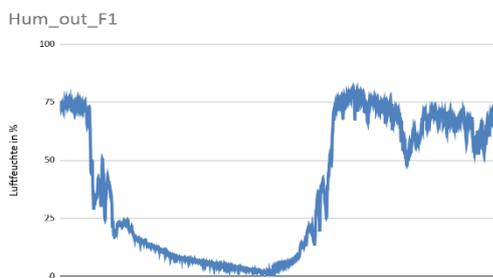


Abbildung 23: Luftfeuchtigkeit außerhalb der Sonde Flug Nr.:1    Abbildung 24: Luftfeuchtigkeit außerhalb der Sonde Flug Nr.:2

Da die Fähigkeit der Luft, Wasser zu speichern, die mit abnehmender Lufttemperatur abnimmt, ist wie erwartet in den Diagrammen zu sehen, dass mit abnehmender Umgebungstemperatur auch die Luftfeuchtigkeit sinkt.

Bemerkenswert ist hierbei aber auch, dass bei der gemessenen steigenden Temperatur ab etwa 15 km Höhe keine Zunahme der Feuchtigkeit zu verzeichnen ist. Dies hängt wohl damit zusammen, dass in diesen Höhen generell nicht viel Feuchtigkeit vorhanden ist.

# Temperatur innerhalb der Sonde

Innentemperatur der Sonde F1

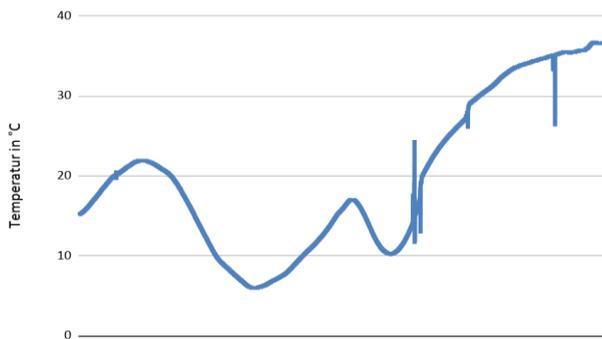


Abbildung 25: Temperatur innerhalb der Sonde Flug Nr.:1

Innentemperatur der Sonde F2

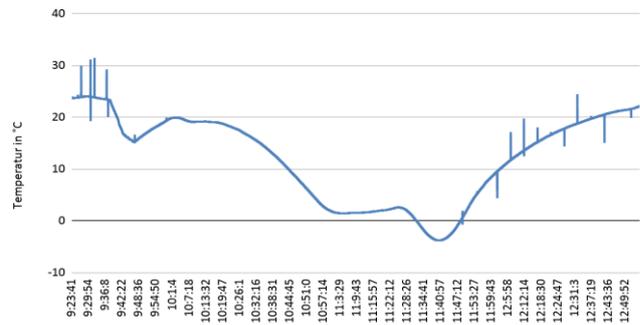


Abbildung 26: Temperatur innerhalb der Sonde Flug Nr.:2

Während außerhalb der Sonde Temperaturen von  $-44^{\circ}\text{C}$  herrschten, sank die Temperatur beim ersten Flug innerhalb der Sonde nicht unter  $6^{\circ}\text{C}$ , was auf der doppelten Isolierung der Sonde zurück zu führen ist.

Ein Nachteil davon war aber, dass nach der Landung der Sonde die Temperatur im Inneren bis auf  $36^{\circ}\text{C}$  anstieg, was zum einen an direkter Sonnenstrahlung lag, vor allem aber an den Batterien, welche nach dem Flug stark Wärme entwickelten.

Beim zweiten Flug verzichteten wir deshalb auf die doppelte Isolierung, um Gewicht zu sparen. Es war zwar damit zu rechnen, dass die Temperatur in der Sonde stärker fallen würde doch auf Grundlage der Tests, die wir vor dem ersten Flug durchgeführt hatten, konnten wir sichergehen, dass die Technik bei solchen Temperaturen noch ohne Probleme arbeiten kann. Wie erwartet fiel die Temperatur in der Sonde geringer aus als beim ersten Flug, jedoch stellte die kälteste auf dem Flug gemessene Innentemperatur mit  $-3,7^{\circ}\text{C}$  kein Problem für die Bordtechnik dar.

## 9. Auswertung Gesamt

Im Nachhinein sind die Ergebnisse der beiden Flüge nur mäßig gut, da eine sehr wichtige Bezugsgröße fehlt, denn alle Messwerte erhalten erst in Verbindung mit der Flughöhe eine echte Bedeutung für die Auswertung. Doch diese fehlt.

Trotzdem sind die Ergebnisse hoch interessant. Auch mit fehlender Bezugsgröße lassen sich die Ergebnisse teilweise eindeutig bewerten. Aber man darf nie vergessen, dass Wind und Wetter ebenfalls einen großen Einfluss auf die Ergebnisse hatten. Doch diesen Einfluss komplett zu eliminieren oder genau zu bestimmen, ist ebenfalls nicht möglich, da das Wetter als chaotisches System keine Möglichkeit gibt, den genauen Einfluss auf die Flüge zu bestimmen. Man kann Aussagen machen z.B. durch Einfluss von Höhenwinden aber tiefgreifende Analysen von Einfluss z.B. der Thermik lassen sich mit meinen Daten nicht so einfach realisieren.

## 10. Fazit

Auch wenn das Projekt aufwendig war und einiges an Zeit gekostet hat, war es sehr spannend und herausfordernd. Wie eingangs erwähnt, musste man vom technischen Standpunkt her vollkommen neue Arbeitsmethoden entwickeln, um sicherstellen zu können, dass nichts während dem Flug ausfällt. Dazu gehörte eine lange Phase aus Testen, Verbessern und wieder Testen, immer mit dem Hintergedanken die Bedingungen, die in 30 km Höhe herrschen, bestmöglich nachzustellen. Auch die Möglichkeit zu haben, aus den Fehlern des ersten Flugs zu lernen und den zweiten Flug diese Fehler zu verbessern, war eine spannende Aufgabe. Trotz dessen bleibt es ernüchternd, dass bei beiden Flügen das GPS-Modul ausgefallen ist, da gerade die damit verbundene Höhenmessung einer der deutlichsten Kennwerte eines Wetterballonflugs sind. Auch wenn ich versucht habe, die Höhe bestmöglich zu bestimmen, bleibt es ungenau und dies stellt mich nicht zu 100% zufrieden. Weswegen der nächste Start schon in Planung ist :).

Aber trotzdem ist es erstaunlich, was man alles aus insgesamt 44.589 Datenpunkten aus beiden Flügen herausarbeiten kann. Diese Verarbeitung der Daten war ebenfalls ein großer Teil des Projektes. Natürlich lassen sie auch einiges an Interpretationsspielraum zu aber manchmal lassen sich die Daten auch ganz einfach erklären z.B. dadurch, dass die Sonde beim ersten Flug verrutscht ist.

Ein besonderer Nervenkitzel war jedes Mal der Start. Denn ab dem Moment an dem man die Sonde los lässt bis zu dem Moment, in dem man sie wiederfindet, ist man komplett machtlos und kann nur darauf vertrauen, dass alles gut geht.

Ich bin froh, dass ich dieses Projekt trotz der vielen Hindernisse und Herausforderungen angefangen habe. Denn die Erfahrungen die ich dabei machen konnte sind unglaublich und geben mir einen neuen Blickwinkel auf vieles was einen umgibt.

Am Ende möchte ich mich noch bei einigen meiner Unterstützer bedanken. Zum einen wäre da meine Sachbearbeiterin bei der Landesluftfahrtbehörde, die mich beim komplizierten Prozess der Genehmigung sehr unterstützt hat. Als nächstes möchte ich meiner Familie danken, die mir die Möglichkeit gegeben hat, ein solch umfangreiches Projekt umzusetzen. Einen besonderen Dank geht an meinen Bruder. Ohne seine Unterstützung und Hilfe wäre das gesamte Projekt nicht realisierbar gewesen.

## Quellenangaben:

[1] Standardatmosphäre 1976:

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Standardatmosph%C3%A4re\\_1976\\_90km.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Standardatmosph%C3%A4re_1976_90km.png)

[2] Volumenelement mit den maßgebenden Einflüssen:

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Veranschaulichung\\_der\\_hydrostatischen\\_Grundgleichung.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Veranschaulichung_der_hydrostatischen_Grundgleichung.svg)

[3] Barometrische Höhenformel:

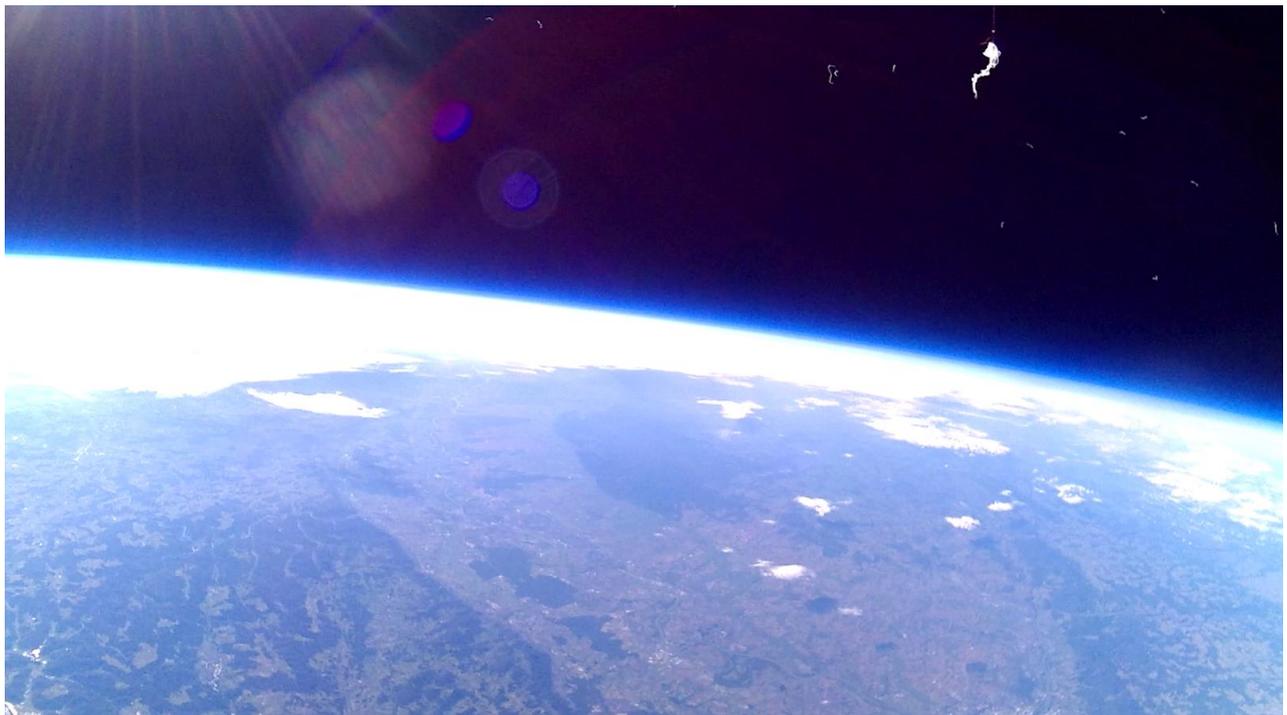
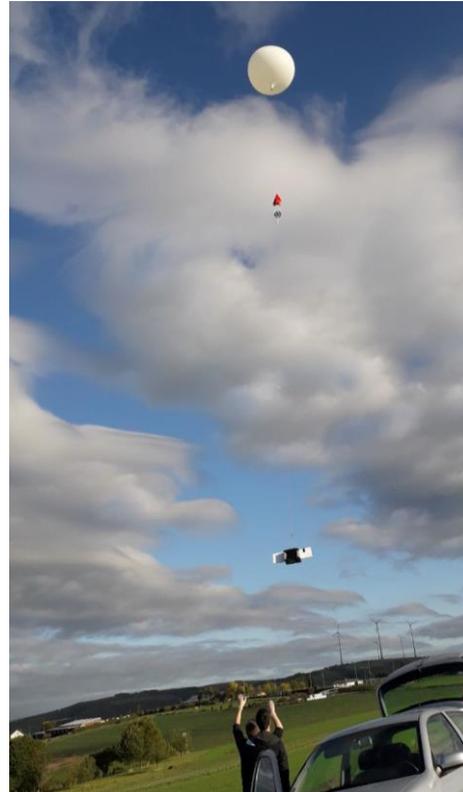
[https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Barometrische\\_H%C3%B6henformel](https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Barometrische_H%C3%B6henformel)

[4] CUSF Landing Predictor:

<https://predict.habhub.org>

# Anhang:

Flug 1





Flug 2



