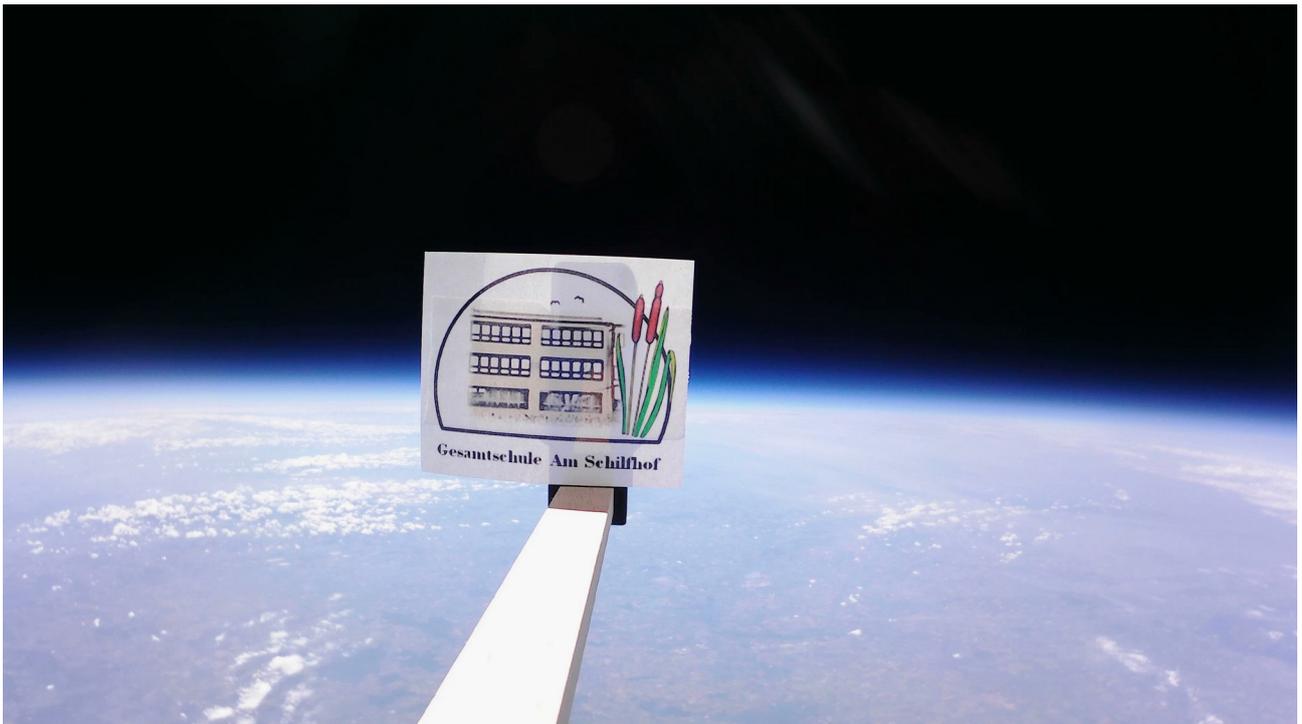




Stratosphärenballonprojekt der Gesamtschule Am Schilfhof

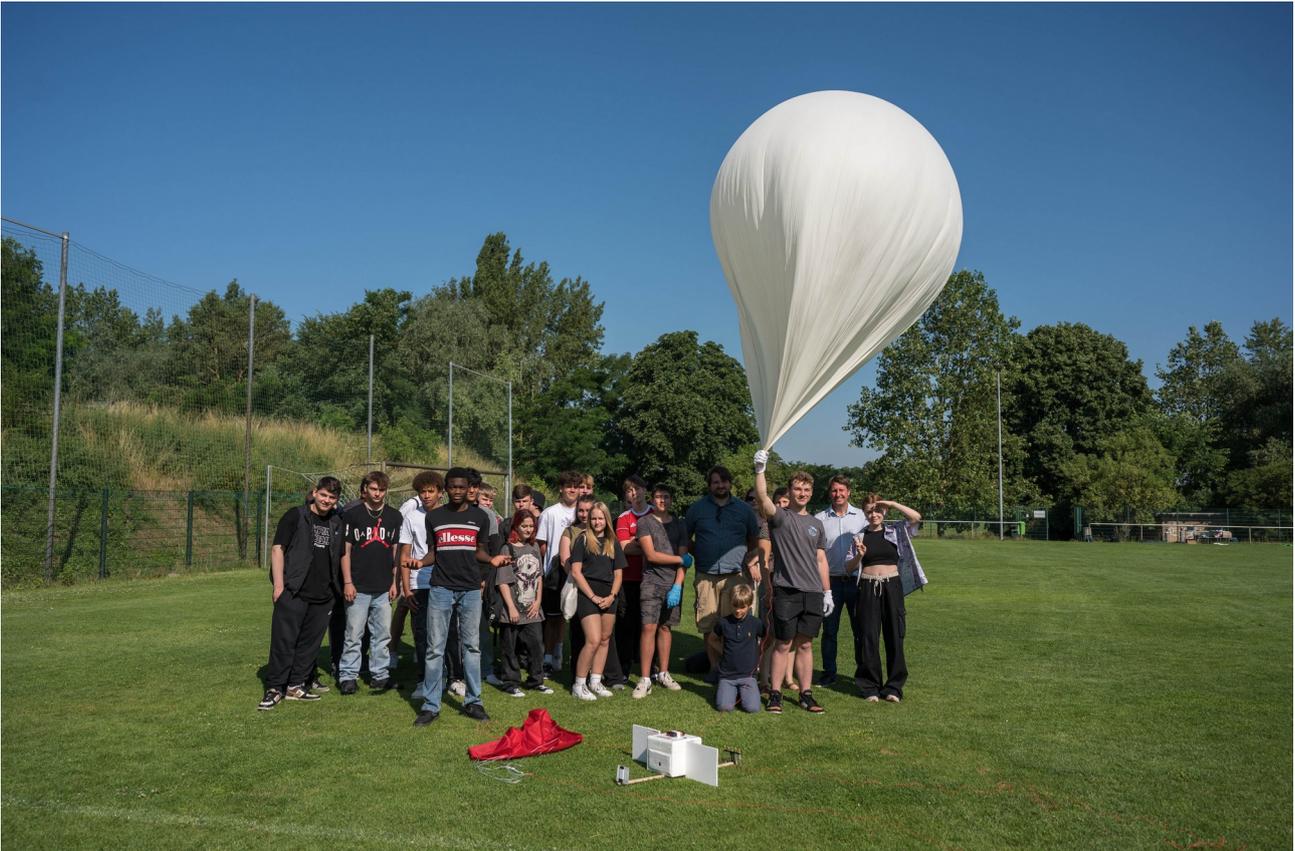


Inhaltsverzeichnis

1. Vorbereitung des Fluges.....	3
1.1 Genehmigungsverfahren.....	3
1.2 Ausrüstung der Sonde.....	5
1.3 Startvorbereitungen.....	6
2. Flugverlauf.....	7
3. Auswertung der Daten.....	9
3.1 Rekonstruktion der Flughöhe.....	10
3.2 Darstellung der Daten.....	11
3.3 Auswertung der Proben.....	13
4. Danksagungen.....	14

1. Vorbereitung des Fluges

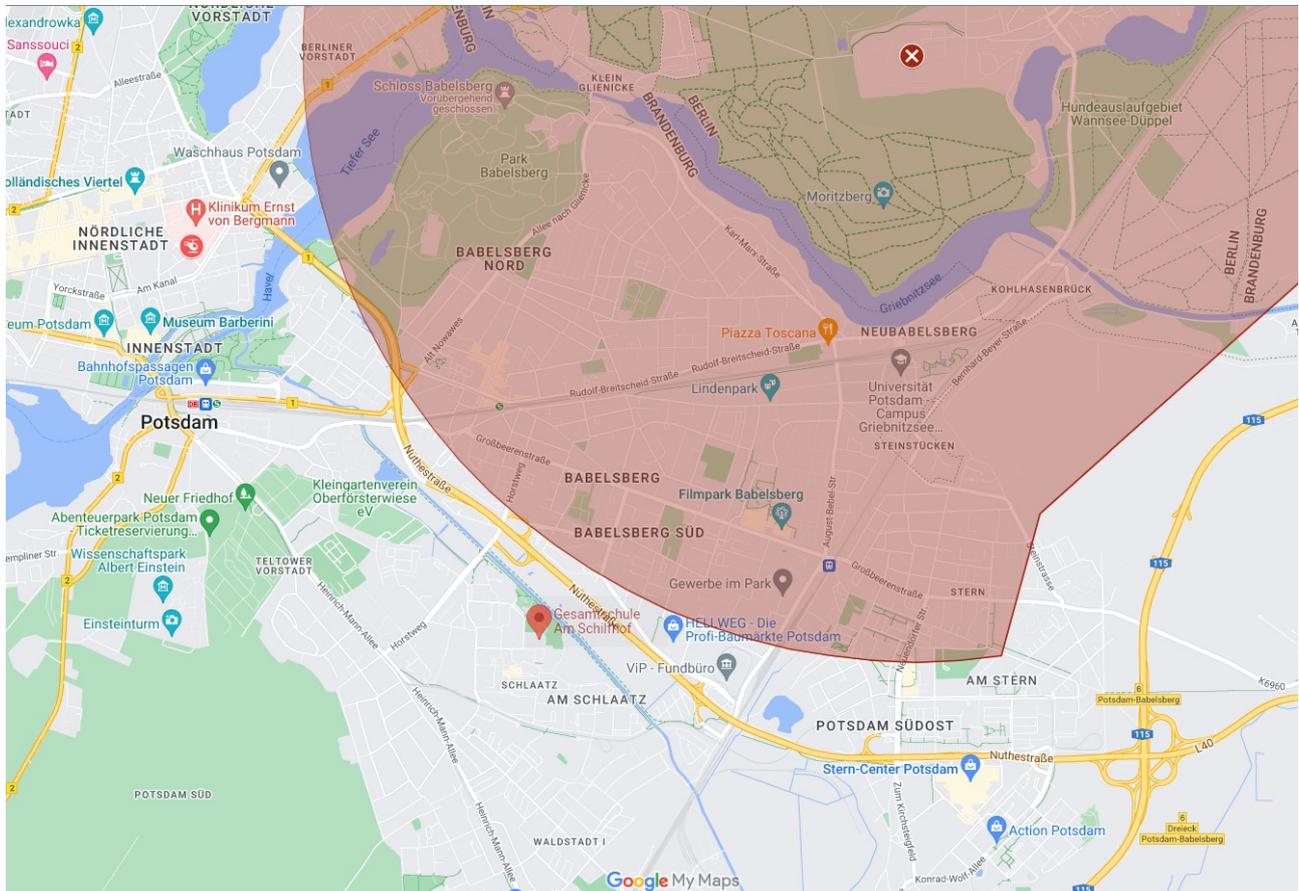
Im Rahmen des Wissenschaftsjahres 2023 ermöglichte das DLR School Lab Oberpfaffenhofen 20 Schulen aus Deutschland, an einem Stratosphärenballonprojekt teilzunehmen. Dabei sollte jeweils ein Wetterballon auf über 35km Höhe aufsteigen und in der Höhe Videomaterial und Messwerte aufnehmen. Wir haben uns entschieden, mit dem Astronomie- und Naturwissenschaftskurs am Ende der 9. Jahrgangsstufe an dem Projekt teilzunehmen.



In der Vorbereitung haben wir im Unterricht einzelne Aspekte des Projektes besprochen: Wie ist unsere Atmosphäre aufgebaut und wo beginnt der Weltraum? Wie funktioniert GPS? Wie können wir den Verlauf des Fluges beeinflussen? Auf welche rechtlichen Gegebenheiten muss Rücksicht genommen werden? Wie vermeiden wir eine Gefährdung des Flugverkehrs?

1.1 Genehmigungsverfahren

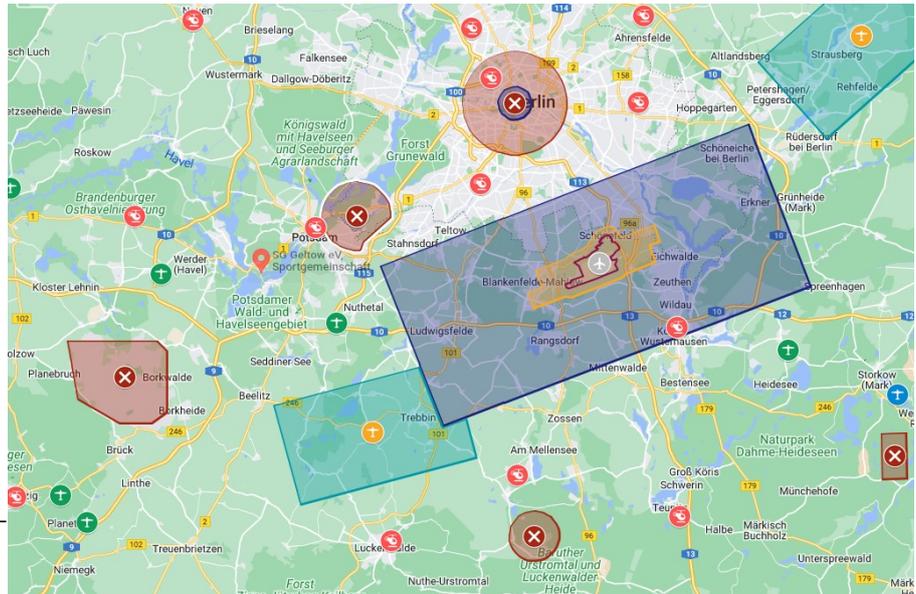
Geplant war zunächst, die Sonde auf dem Sportplatz der Gesamtschule Am Schilfhof zu starten. Aufgrund der Nähe zum Flugbeschränkungsgebiet ED-R 4 (rot schraffierter Bereich) mussten wir diesen Plan aufgeben.



Als alternativen Startort haben wir einen Sportplatz in Geltow gewählt. Mehrere Flugplätze, Flugbeschränkungsgebiete und der Flughafen BER im Süden von Berlin erschwerten die Planung des Vorhabens.

Der Sportplatz der SG Geltow e.V. war eine gute Alternative, da er hinreichend weit vom ED-R 4 und den anderen Flugbeschränkungsgebieten ED-R 54 Lehnin, ED-R 56 Kummersdorf Gut und dem ED-R 146 im Zentrum von Berlin entfernt war. Diese Flugbeschränkungsgebiete durften im Verlauf des Sondaufstiegs und -abstiegs nicht durchflogen werden. Hier waren insbesondere der Start und die Landung zu berücksichtigen, da sich die Flugbeschränkungsgebiete maximal in eine Höhe von bis zu 3500ft erstrecken.

Rot markierte Flächen in der Karte sind Flugbeschränkungsgebiete. Das blaue Rechteck kennzeichnet die Kontrollzone des Flughafens BER, das türkise ein Gebiet mit Funkkommunikationspflicht des Flugplatzes Schönhagen. Beide Gebiete durften durchflogen werden – jedoch haben wir die Tower



über den geplanten Start in Kenntnis gesetzt. Dabei fiel auf, dass die Kommunikation mit den Verantwortlichen der Flugsicherung viel unkomplizierter und pragmatischer war, als die Kommunikation mit den verantwortlichen Ämtern, insbesondere dem Bundesaufsichtsamt für Flugsicherung.

Die Entwicklung der Prognosen der Flugbahn im Vorfeld des Starttages entwickelte sich zu einem echten Krimi. Teilweise schwankte die prognostizierte Landestelle um fast 100km. Insbesondere das ED-R 56 war teilweise gefährlich nah der prognostizierten Landestelle. Auch eine Landung in der unmittelbaren Nähe des BER musste vermieden werden.

1.2 Ausrüstung der Sonde

Unsere Sonde war mit einer *Apeman Actioncam* mit zusätzlichem Akku, einem *STRATO4* Datenlogger, dem GPS-Tracker *STRATOfinder* und dem *SPOT Gen4* Satelliten-GPS-System ausgerüstet. Alle Systeme wurden im Unterricht ausführlich getestet. Die Messsonde des Datenloggers wurde auf der Oberfläche der Styroporsonde befestigt, damit auch eine Messung der



Strahlungsleistung in 4 verschiedenen Wellenlängenbereichen möglich ist. Das Satelliten-GPS-

System wurde an der Außenseite der Sonde mit Klebeband befestigt, damit der GPS – Empfang wenig gestört wird.

Weiterhin haben wir an unserer Sonde einen Probenhalter mit vier Reagenzgläsern befestigt. Diese wurden mit verschiedenen organischen Proben bestückt. Nach dem Flug sollten sie erneut mikroskopiert werden, um Änderungen erkennen zu können. Als Probenmaterial haben wir uns für Schweineleber, Zwiebel und zwei Wasserproben aus der Nuthe entschieden.



1.3 Startvorbereitungen

Nachdem die Wetterprognosen und Vorausberechnung der Flugbahn immer besser wurden, haben wir uns entschieden, einen Start am 26.06.23 zu versuchen. Wir trafen uns um 08:00 Uhr auf dem Sportplatz der SG Geltow e.V. Die Bedingungen waren ideal: wolkenloser Himmel, wenig Wind und eine vorausberechnete Flugbahn, die bei der Landung 15 km Sicherheitsabstand vom ED-R 56 voraussagte. Nachdem die Sonde vorbereitet

und die Proben befüllt waren, haben wir die genaue Masse der Sonde mit 900g bestimmt. Zum Erreichen der Aufstiegs geschwindigkeit von $5,5 \frac{m}{s}$ wurden 211bar aus einer 20l – Ballongasflasche benötigt. Da unsere Druckflasche mit 215bar Startdruck etwas überfüllt war, haben wir uns entschlossen, genau eine 20l Flasche Ballongas einzufüllen.



Das vorsichtige Befüllen des Ballons benötigte ca. 45 Minuten – alle Schülerinnen und Schüler waren hochkonzentriert um Fehler und Verletzungen des unhandlichen Ballons zu vermeiden.

Nach dem Verschließen des Ballons wurde der Fallschirm 5m unterhalb des Ballons an einer Sicherheitsschnur befestigt. 15m unterhalb des Fallschirms hing dann unsere Sonde.

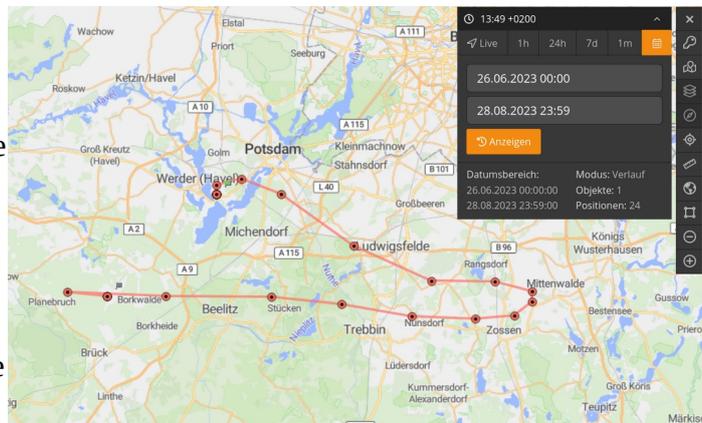
Direkt vor dem Start haben wir dann den Flughafen BER und den Flugplatz Schönhagen über den bevorstehenden Start informiert. Dann konnte es losgehen.



Um genau 09:37 Uhr hob der Ballon ab und verschwand im blauen Himmel. Wir erwarteten eine Flugzeit von 170 Minuten und eine Landestelle in der Nähe der Stadt Trebbin.

2. Flugverlauf

Nachdem der Start geglückt war, haben wir die Ausrüstung zusammengepackt und sind mit 5 PKW nach Trebbin gefahren, um in der Nähe der mutmaßlichen Landungsstelle zu sein. Das *SPOT Gen4* Satelliten-GPS-System übermittelte Daten, und so konnten wir die Flugbahn live verfolgen. Allerdings fiel schnell auf, dass die Höhenwerte, die übermittelt wurden, nicht den Erwartungen entsprachen. Es sah so aus, als ob der Ballon zwischen 10 000m und 20 000m Flughöhe schwankte. Die Flugkurve über dem Boden entsprach jedoch unseren Erwartungen.



Nach 12:11 Uhr brach die Übertragung ab und es wurden keine neuen Positionen mehr übermittelt. Da der Ballon mutmaßlich auch nicht die geforderte Höhe erreicht hatte, gingen wir von einem Fehlschlag aus. Ein Signal vom *STRATOfinder* lag nicht vor.

Während wir auf dem Weg zur mutmaßlichen Absturzstelle in Borkwalde waren, haben wir gegen 12:55 Uhr das Signal vom *STRATOfinder* in der Nähe der prognostizierten Landestelle in Trebbin

empfangen. Dies war überraschend, da der Flug offensichtlich eine halbe Stunde länger war, als wir prognostiziert hatten.

Wir fuhren also zu den neuen Koordinaten und konnten um 13:50 Uhr die Sonde in der Nähe des alten Rittergutes in Groß Beuthen auf einem Feld bergen. Offensichtlich hatte der an der Außenseite befestigte *SPOT Gen4* den Flug nicht überstanden und war nicht mehr an der Sonde befestigt. Ebenfalls fehlten zwei Proben, so dass wir nur noch eine Wasserprobe und die Zwiebelprobe vorfanden. Entweder hat sich der Verschluss des Reagenzglases durch den niedrigen Außendruck gelöst, oder er wurde bei der rabiaten Landung auf dem Feld abgerissen.

Zumindest die Kamera lief bei der Bergung noch und war auch nicht verrutscht. Wir hofften auf gute Bilder!

3. Auswertung der Daten

Bei der Sichtung der aufgezeichneten Daten fiel auf, dass das aufgezeichnete Videomaterial wunderschön und spektakulär war. Bei der Auswertung des Bildmaterials waren viele Details am Boden zu erkennen. Wir konnten die deutsche Ostsee, Rügen Dänemark und Schweden sehen!



Der Flug ist auch – entgegen der früheren Annahme – annähernd nach Plan verlaufen, denn den Bildern zufolge platzte der Ballon in der oberen Stratosphäre. Nach dem Platzen des Ballons trudelte die Sonde und ruckte mehrfach hart in die Schnüre ein, welche die Sonde mit dem Fallschirm verbanden. Dabei scheint der *SPOT Gen4* abgerissen worden zu sein. Vielleicht hielt auch der Klebestreifen durch die Kälte und den geringen Luftdruck nicht mehr fest.

Bei den Daten des *STRATO4* Datenloggers bemerkten wir, dass die GPS-Daten nicht brauchbar waren. Wie schon die GPS-Daten des *SPOT Gen4* unplausible Höhen lieferten, waren auch die

Koordinaten des in der Sonde platzierten Datenloggers unbrauchbar. Dies betraf alle Raumkoordinaten. Die erreichte Höhe blieb also zunächst unklar.

Die Diagramme der aufgezeichneten Temperaturen und des Luftdrucks in Abhängigkeit von der Zeit sahen jedoch gut aus. Der Luftdruck beim Start der Sonde betrug 1011,6 hPa bei einer Starthöhe von 80m über NN. Der Luftdruck kurz vor dem Platzen betrug 3,9 hPa. Zur Landung betrug der Luftdruck 1009,8 hPa bei 88m über NN.

Die Werte der Strahlungssensoren waren in allen Wellenlängenbereichen unbrauchbar, da sie den Messbereich des Sensors überschritten.

3.1 Rekonstruktion der Flughöhe

Da unsere GPS-Daten unbrauchbar waren, blieb keine andere Möglichkeit, als die erreichte Flughöhe aus den Druckdaten zu rekonstruieren. Eine einfache Methode ist die Anwendung der barometrischen Höhenformel.

$$p(h) = p_0 \cdot e^{-\frac{M \cdot g \cdot h}{R \cdot T}},$$

wobei $p(h)$ der Druck in der Höhe h ist. $M = 0,02896 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$ beschreibt die mittlere molare Masse

der Atmosphäre, $g = 9,812 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ die Fallbeschleunigung, $R = 8,314 \frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{mol}}$ ist die universelle

Gaskonstante und T die absolute Temperatur der Gassäule.

Die Anwendung dieser Grundgleichung ist nur eine Näherung. Weder die Temperatur noch die molare Masse der Atmosphäre noch die Fallbeschleunigung sind im Atmosphärenprofil konstant.

In dieser Näherung ergibt sich die Flughöhe mit

$$h = \frac{R \cdot T}{M \cdot g} \ln \left(\frac{p_0}{p(h)} \right)$$

Unter der Annahme, dass die mittlere Temperatur der Atmosphäre bei $T = -30^\circ \text{C} = 243,15 \text{ K}$ lag, beträgt eine grobe Abschätzung der Flughöhe

$$h_g = \frac{R \cdot T}{M \cdot g} \ln \left(\frac{p_0}{p(h)} \right) + 80 \text{ m} = 39623 \text{ m}.$$

Wie bereits erwähnt gilt dies unter realen Bedingungen nicht. Die gemessene Temperatur schwankt zwischen 311,4K am Start und 234,5K in der Tropopause. Die molare Masse der Atmosphäre wird durch unterschiedliche Luftfeuchten und im geringen Maße durch Entmischungseffekte der Atmosphäre beeinflusst. Die Fallbeschleunigung ändert sich minimal – eine gewisse Höhen- und Ortsabhängigkeit können nicht ausgeschlossen werden.

Diese Effekte lassen sich prinzipiell mit unseren Messwerten berücksichtigen. Die Lösung wäre, die Höhenformel schichtweise von Messwert zu Messwert anzuwenden. Die benötigten Messungen der Temperatur liegen vor. Die relativen Luftfeuchtigkeiten liegen ebenfalls vor, weisen aber große und unphysikalische Schwankungen auf.

Wir haben jedoch eine andere Lösung gefunden und stattdessen das Geoforschungszentrum Potsdam um Hilfe gebeten. Ein großer Dank geht an Florian Zus, der uns mit Profildaten der Atmosphäre aus ECMWF-Modellanalysen versorgt hat. Aus unseren Daten ist zu erkennen, dass der Ballon 141 Minuten nach Start um 12:18 Uhr geplatzt ist. Daher haben wir die Profildaten für 12:00 MESZ verwendet.

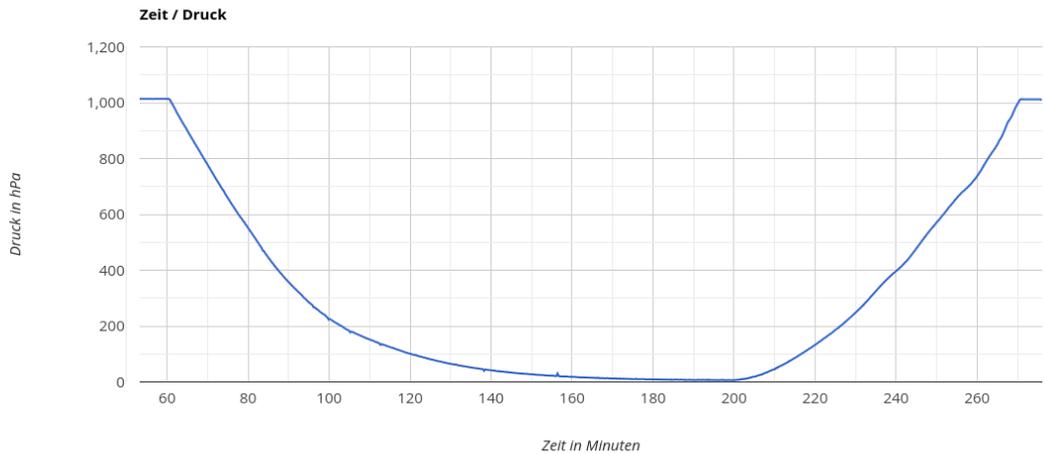
Die Werte des Datenloggers geben den Luftdruck mit nur einer Nachkommastelle an und beinhalten zufällige Messfehler. Zur besseren Abschätzung haben wir in der Datenauswertung jeweils 7 Messwerte – das entspricht 14 Sekunden – zusammengefasst, den größten und kleinsten Wert vernachlässigt und die verbleibenden fünf Messwerte arithmetisch gemittelt. Damit beträgt der minimale Luftdruck $p_{min}=3,92 \text{ hPa}$. Aus den Profildaten entnehmen wir den Luftdruck auf verschiedenen Höhen $p(38500 \text{ m})=3,96 \text{ hPa}$ beziehungsweise $p(38600 \text{ m})=3,91 \text{ hPa}$. Durch lineare Interpolation kommen wir zu unserer besten Abschätzung der Flughöhe von

$$h = 38580\text{m}$$

über NN.

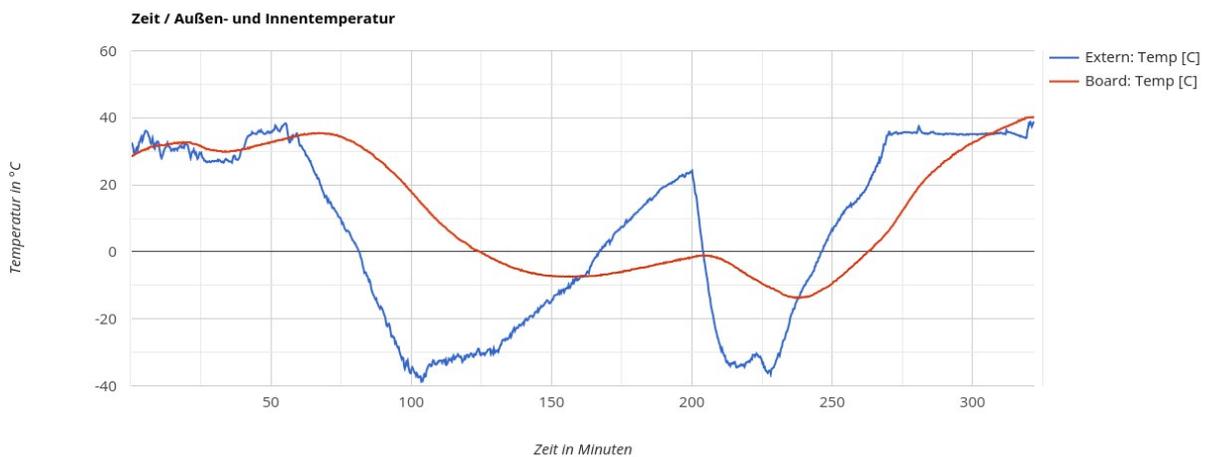
3.2 Darstellung der Daten

Da die GPS-Daten fehlerhaft sind, können die Abhängigkeit physikalischer Größen von der Höhe nicht dargestellt werden. Das Luftdruck-Zeit-Diagramm



lässt klar erkennen, dass bei Minute 61 der Ballon gestartet wurde, bei Minute 202 platzte und bei Minute 271 gelandet ist.

Im Temperatur-Zeit-Diagramm



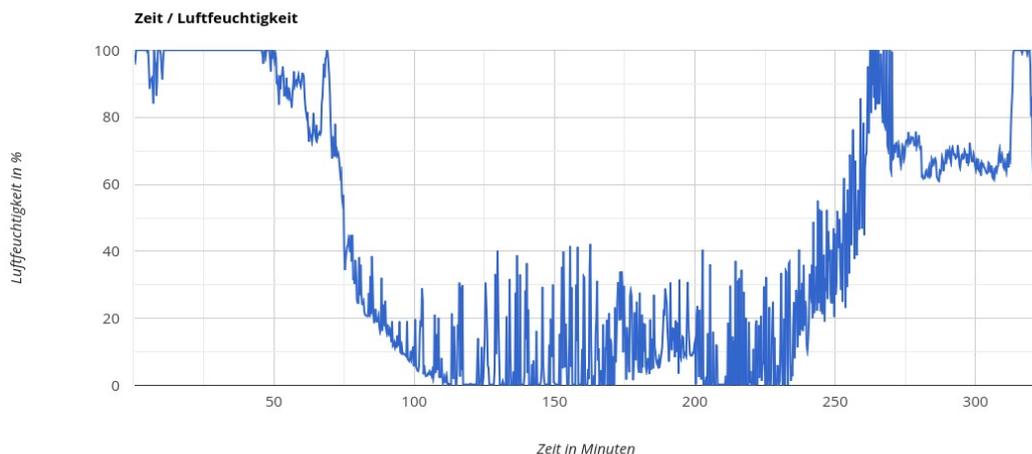
sind die Außentemperaturen und die Temperaturen in der Sonde dargestellt. Da der Startplatz und der Landeplatz in direktem Sonnenlicht lagen steigen hier die Temperaturen stark an, auffällig ist, dass die Temperatur in der Tropopause (geringste Temperatur des Fluges bei Minute 105) mit

-38,6°C erstaunlich hoch ist. Auch in diesem Diagramm ist der Zeitpunkt des Platzens bei Minute 202 klar zu erkennen. Hier lag die Temperatur bei +24°C ebenfalls ungewöhnlich hoch.

Der Vergleich mit den ECMWF-Daten ist auch für die Temperatur möglich. Danach sollte die Temperatur in der Tropopause -56,5°C betragen haben. Die Temperatur in 38600m Höhe müsste demnach -17,9°C betragen haben. Obwohl diese Abweichungen sehr groß sind, erscheinen sie jedoch plausibel. Die Sonde selber hat eine relevante Wärmekapazität im Vergleich mit der umgebenen trockenen Luft bei den entsprechenden niedrigen Drücken. Weiterhin stellt die Sonde selber eine Wärmequelle dar, da die Akkus im Betrieb Wärme erzeugen. Außerdem erscheint es plausibel, dass die Sonde sich nicht in einem thermodynamischen Gleichgewicht mit der Umgebung befindet, da der Wärmetransport durch den niedrigen Luftdruck nur eingeschränkt möglich ist.

Diese großen Abweichungen in den Messwerten der Temperaturen von den realen Bedingungen hätten eine Bestimmung der Flughöhe durch schichtweises Anwenden der barometrischen Höhenformel unmöglich gemacht.

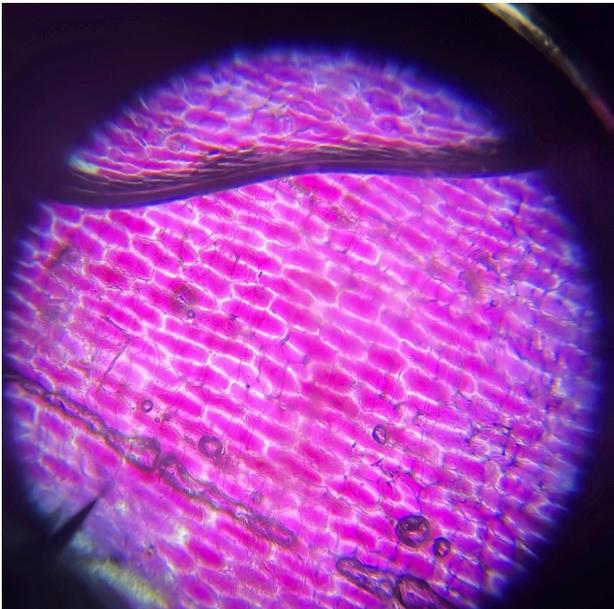
Im Luftfeuchtigkeitsdiagramm



sehen wir ebenfalls den erwarteten Verlauf – allerdings mit größeren Messfehlern. Zum Start am Morgen war die Luftfeuchtigkeit noch sehr hoch. In der Tropopause (Minute 105) sinkt sie auf nahe Null (mit großen unphysikalischen Schwankungen) und steigt erst kurz vor der Landung wieder an. Das Abfallen nach der Landung kann eventuell dadurch erklärt werden, dass der Sensor durch den Flug noch kälter war als die Umgebung, und deswegen die gemessene relative Luftfeuchtigkeit zu hoch ist.

3.3 Auswertung der Proben

Bei der Mikroskopierung der Wasserproben sind keine verwertbaren Erkenntnisse gewonnen worden. Der Vergleich der Zwiebelproben vor und nach dem Flug ist jedoch interessant. Bei den Bildern wurde jeweils die Zwiebelhaut einer roten Zwiebel durch Schüler mikroskopiert.



Das linke Bild wurde von einem Schüler vor dem Flug mikroskopiert. Das rechte Bild ist nach dem Flug entstanden. Leider haben die Bilder unterschiedliche Vergrößerungen. Trotzdem ist klar zu erkennen, dass die Zwiebelzellen vor dem Flug eine eher längliche Form haben. Das Verhältnis Länge : Breite beträgt 2:1 bis 4:1. Nach dem Flug ist das Verhältnis eher 1,5:1. Dies könnte auf eine Verformung der Zellen durch den absinkenden Luftdruck hindeuten.

4. Danksagungen

Wir möchten uns herzlich beim DLR-School-Lab Oberpfaffenhofen für die Möglichkeit bedanken, an diesem einmaligen Projekt teilzunehmen. Insbesondere gilt unser Dank Tobias und Lisa Schüttler, die uns bei dem Projekt in verschiedenen Phasen unterstützt haben.

Weiterhin möchten wir uns bei den Eltern unserer Schüler bedanken, die durch ihre Fahrdienste dafür gesorgt haben, dass wir alle interessierten Schüler zum Bergen der Sonde mitnehmen konnten.

Außerdem geht ein großes Dankeschön an Florian Zus, der uns für die Auswertung mit Profildaten der Atmosphäre versorgt hat.

Wir danken dem Förderverein der Gesamtschule Am Schilfhof für die Bereitstellung weiterer finanzieller Mittel zur Realisierung des Projektes.

Brayan, Galena, Maurice, Shamil, Sofia, Braian, Zaynab, Felix, Luisa, Dilon, Tuna, Philipp, Joyleen, Laith, Isabell, Amelie, Leonard, Jeremy, Delnia, Loreen, Benjamin, Neele, Colin, Liliana, Nick, Tobias, Emma, Sahar, Finn, Tobias, Lea-Celine, Denzel, Justin, Leonie, Ole, Carolin, Nick, Konstantin, Fr. Broich, Hr. Wuttke