

Luftfeuchtigkeit in der Erdatmosphäre bis 36 km Höhe

Untersuchungen mit einem Stratosphärenballon

Tim B. Oelke
Matr. Nr.: 4000395

18. Juli 2021

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Theoretische Betrachtungen	4
2.1	Erdatmosphäre	4
2.2	Luftfeuchtigkeit	6
2.2.1	Relative Luftfeuchtigkeit	7
2.2.2	Absolute Luftfeuchtigkeit	7
2.2.3	Spezifische Feuchte und Mischungsverhältnis	8
3	Missionsplanung und -vorbereitung	10
4	Missionsdurchführung	13
5	Auswertung	16
5.1	Flugparameter	16
5.2	Lufttemperatur	16
5.3	Luftdruck	17
5.4	Luftfeuchtigkeit	17
6	Fazit	20
7	Literatur- und Quellenverzeichnis	21
8	Anhang	23
8.1	Ardiuno Code	23
8.2	Messwertdiagramme	24
8.3	Aufnahmen der Bordkamera	28

1 Einleitung

„Der Weltraum, unendliche Weiten. Wir schreiben das Jahr 2200. Dies sind die Abenteuer des Raumschiffs Enterprise, das mit seiner 400 Mann starken Besatzung 5 Jahre lang unterwegs ist, um neue Welten zu erforschen, neues Leben und neue Zivilisationen. Viele Lichtjahre von der Erde entfernt, dringt die Enterprise in Galaxien vor, die nie ein Mensch zuvor gesehen hat.“ [1]

Haben wir uns nicht früher alle gewünscht, mit Captain Kirk, Commander Spock und der Enterprise das Universum zu erkunden? Dass das aus verschiedenen Gründen nicht so einfach ist, dürfte mittlerweile jedem bewusst sein. Nichtsdestotrotz bleibt der Traum etwas Neues zu entdecken und was eignet sich dafür besser als der Weltraum?

Weltraummissionen sind in der Realität allerdings sehr komplexe, kost- und zeitspielige Angelegenheiten, weshalb es nur einem sehr kleinen Kreis an Menschen vorbehalten bleibt diese durchzuführen. Um trotz der begrenzten finanziellen Mittel einer Universität und dem zeitlich engen Rahmen eines Semesters in Richtung Weltraum zu kommen, kann eine Stratosphärenballonmission durchgeführt werden. Hierfür wird ein Wetterballon mit Helium befüllt und mit einer Sonde beladen, welche verschiedenste Experimente enthalten kann. Mit dem Aufstieg und dem damit verbundenen sinkenden Umgebungsluftdruck expandiert das Helium im Ballon. Überschreitet die Differenz zwischen Innen- und Außendruck die Elastizität des Ballons, platzt dieser und die Sonde fällt von einem Fallschirm gebremst zurück in Richtung Erdoberfläche.

Eine solche Ballonmission wurde Ende 2020 vom II. Physikalischen Institut der Justus-Liebig-Universität in Gießen durchgeführt. Im Rahmen dieser entstanden drei Arbeiten, die jeweils unterschiedliche Experimente in der Sonde behandeln. Primär wurde kosmische Partikelstrahlung in der Stratosphäre untersucht. Mehr dazu ist in *„High-altitude balloon experiment - Implementation of a nuclear photo emulsion for the detection of high-energy particles in cosmic radiation“* von William Roster nachzulesen. Außerdem wurde in *„Planung, Durchführung und Auswertung einer Stratosphärenballonmission“* von Lars Klingenstein die Ozonschicht untersucht.

Diese Arbeit beschäftigt sich besonders mit der Luftfeuchtigkeit in den mit dem Stratosphärenballon durchquerten Luftschichten. Dazu wird zu Beginn ein Überblick über die theoretischen Grundlagen der Erdatmosphäre und der Luftfeuchtigkeit gegeben, bevor auf die Missionsplanung und -durchführung eingegangen wird. Zum Schluss werden die gewonnen Messdaten ausgewertet und eingeordnet.

2 Theoretische Betrachtungen

2.1 Erdatmosphäre

Der vermutlich wichtigste Bestandteil unseres Planeten, der zur Entwicklung des Lebens wie wir es kennen beigetragen hat, ist Wasser. Dieses kann aber nur in flüssiger Form auf der Erde vorkommen, da sie von einer Atmosphäre und einem diese schützenden Magnetfeld umgeben ist. Beides ist bei weitem nicht selbstverständlich für Planeten.

Im Allgemeinen muss ein Planet eine bestimmte Masse aufweisen, damit er überhaupt dazu in der Lage ist Gase gravitativ an sich zu binden. Außerdem darf die Oberflächentemperatur nicht zu hoch sein, da die gravitativ gebundenen Gasteilchen ansonsten durch thermische Geschwindigkeiten größer der Fluchtgeschwindigkeit das Schwerefeld des Planeten wieder verlassen können. Zudem hilft ein planetares Magnetfeld, da es die Atmosphäre vor kosmischer Partikelstrahlung wie beispielsweise Sonnenwinden schützt. Diese würden durch ihre hohen Impulse die Gasteilchen aus der Atmosphäre zurück in den Weltraum katapultieren. [2]

Durch Beschuss mit Materie aus dem Weltraum, vulkanische Aktivität, Bildung einer Ozonschicht und Photosynthese hat sich die heutige Erdatmosphäre in etwa 4,55 Milliarden Jahren ausgebildet. Sie besteht zum größten Teil aus Stickstoff (78,08 %_{vol}), Sauerstoff (20,95 %_{vol}) und Argon (0,94 %_{vol}). Dazu kommen noch verschiedenste Spurengase im *ppm* und *ppb* Bereich (vgl. Tab. 1) sowie Wasserdampf mit bis zu 4 %_{vol}. Der mittlere Anteil von Wasserdampf in der Atmosphäre beträgt 2,6 %_{vol}. Der exakte Wert variiert, genau wie der verschiedener Stick- und Kohlenstoffoxide, von Ort zu Ort und je nach Wetterlage. [2]

Die Atmosphäre der Erde ist aber keineswegs eine homogen verteilte Akkumulation von Gasen, sondern besteht aus verschiedenen Schichten (vgl. Abb. 1). Die Einteilung in diese Schichten erfolgt primär über den Verlauf der Temperaturkurve. Die unterste Schicht, die **Troposphäre**, hat eine stark temperaturabhängige Dicke von durchschnittlich etwa 12 km. Am Äquator beträgt sie 17 km und an den Polen nur etwa 7 km. In ihr befinden sich circa drei Viertel der gesamten Masse der Atmosphäre sowie fast der gesamte Wasserdampf. Durch die thermische Konvektion der Gase spielt sich in der Troposphäre der Großteil des Wetters ab. Nach oben hin wird sie von der Tropopause

Kohlendioxid (CO ₂)	400 <i>ppm</i>	Ozon (O ₃), stratosphärisch	0,31 <i>ppm</i>
Neon (Ne)	18,2 <i>ppm</i>	Kohlenmonoxid (CO)	50 – 200 <i>ppb</i>
Helium (He)	5,24 <i>ppm</i>	Xenon (Xe)	90 <i>ppb</i>
Methan (CH ₄)	1,7 <i>ppm</i>	Ozon (O ₃), troposphärisch	30 <i>ppb</i>
Krypton (Kr)	1,1 <i>ppm</i>	FCKWs	4,84 <i>ppb</i>
Wasserstoff (H ₂)	0,56 <i>ppm</i>	Stickoxide (NO _x)	0,5 – 5 <i>ppb</i>
Distickstoffoxid (N ₂ O)	0,32 <i>ppm</i>	Radon (Rn)	6 · 10 ⁻⁷ <i>ppb</i>

Tabelle 1: Die 14 häufigsten Spurengase der Erdatmosphäre, Stand 2016. [2]

begrenzt, welche durch ein lokales Temperaturminimum charakterisiert ist. An ihr finden, durch die untere Grenze der Ozonschicht, die turbulenten Vertikalbewegungen der Troposphäre ein abruptes Ende [6]. Darüber schließt sich die **Stratosphäre** an. Mit zunehmender Höhe steigt hier auch die Temperatur, was auf die Absorption von UV-Strahlung durch das stratosphärische Ozon zurückzuführen ist. In knapp 50 km Höhe schließt die Stratopause die Stratosphäre mit einem lokalen Temperaturmaximum ab [7]. Dadurch, dass darüber kaum noch Ozon vorhanden und die Dichte der Luft sehr gering ist, fällt die Temperatur in der **Mesosphäre** wieder auf bis zu durchschnittlich -90 °C . An diesem Punkt befindet

sich die Mesopause [8]. Betrachtet man Höhen von mehr als 80 km über der Erdoberfläche, so ist die Dichte der Atmosphäre so gering, dass kaum noch Temperaturexaustausch durch Stöße auftritt. In Folge dessen steigt die Temperatur in der **Thermosphäre** wieder rapide an. Tagsüber können Temperaturen von bis zu 1400 °C erreicht werden, während sie nachts auf bis zu 0 °C sinken [9]. In 700 bis 800 km Höhe schließt sich als letzte atmosphärische Schicht die **Exosphäre** an. Sie ist der Übergang zum interplanetaren Raum und die Schicht, aus der Gasmoleküle das Schwerefeld der Erde verlassen können. Gehindert werden sie hierbei davon, dass die Moleküle in der **Ionosphäre** (Mesos- bis Exosphäre) häufig durch UV- oder Partikelstrahlung ionisiert sind. Aufgrund dessen kommt es zu Wechselwirkungen mit dem Erdmagnetfeld und die geladenen Gasteilchen bewegen sich entlang der geschlossenen Magnetfeldlinien [10]. Diese **Magnetosphäre**, deren Feldlinien sich teilweise bis hinter die Mondbahn erstrecken, ist jedoch neben dem Verhindern von Gasausstoß auch für den Schutz der Atmosphäre vor interplanetaren und intergalaktischen (geladenen) Teilchen zuständig. Primär lenkt sie die Partikelstrahlung um die Erde herum, bei sehr hoher Aktivität, wie zum Beispiel starken Sonnenwinden, kann es aber auch dazu kommen, dass die Teilchen in die Magnetosphäre eindringen, dort an den Magnetfeldlinien abgelenkt werden und in den Polarregionen mit den Teilchen der Ionosphäre wechselwirken. Dadurch entsteht das allgemein bekannte „Polarlicht“ [11]. [2][5]

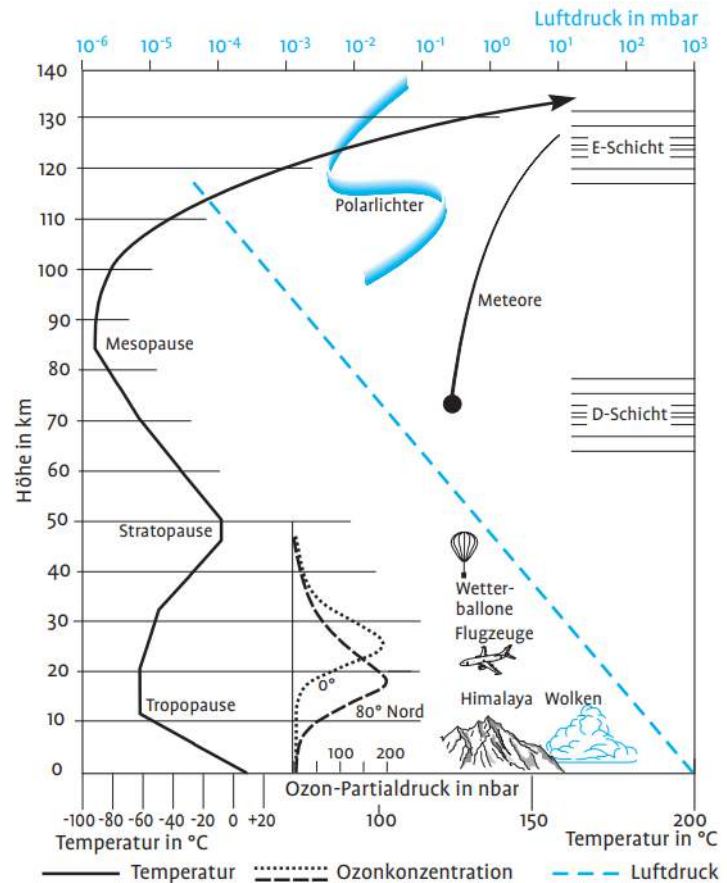


Abb. 1: Darstellung der Atmosphärenschichtung nach der US-Standardatmosphäre. [19]

2.2 Luftfeuchtigkeit

Die Luftfeuchtigkeit ist neben der Lufttemperatur und dem Luftdruck eine der Basisgrößen der Meteorologie. Sie beschreibt den Anteil des Wasserdampfes in der Luft. Das Wasser kommt durch Verdunstung, vor allem über den Ozeanen, in die Atmosphäre und macht dort einen Anteil von nahezu 0%_{vol} (bei extremer Kälte) bis 4%_{vol} (bei tropisch-heißen Luft) aus. Es ist außerdem das einzige Molekül, welches in der Erdatmosphäre in drei Aggregatzuständen vorkommt. Es kann in der festen (Eis), der flüssigen (Wasser, Regen) und in der gasförmigen Phase (Wasserdampf) vorliegen. [4][12][13]

Wasserdampf kann in der Atmosphäre als ideales Gas betrachtet werden und übt somit einen Partial- bzw. Dampfdruck e aus. Für den Gesamtdruck p in der Atmosphäre gilt das Daltonsche Gesetz, wonach dieser sich aus der Summe der Partialdrücke aller Gase zusammensetzt:

$$p = \sum p_i$$

Der Partialdruck des Wasserdampfes ist nicht konstant. Grund dafür sind die verschiedenen Formen des Wasserdampfes. Dieser tritt unterschättigt, gesättigt und überschättigt auf. Ist er unterschättigt, nimmt die Luft durch Verdunstung mehr Wasser auf als sie wieder abscheidet. Ist der Wasserdampf gesättigt, sind die Abscheide- und Verdunstungsraten gleich. Bei überschättigtem Dampf hält dieser so viel Wasser, dass bei Kontakt mit einer Oberfläche mehr kondensiert als aufgenommen werden kann (vgl. jew. Abb. 2). [3]

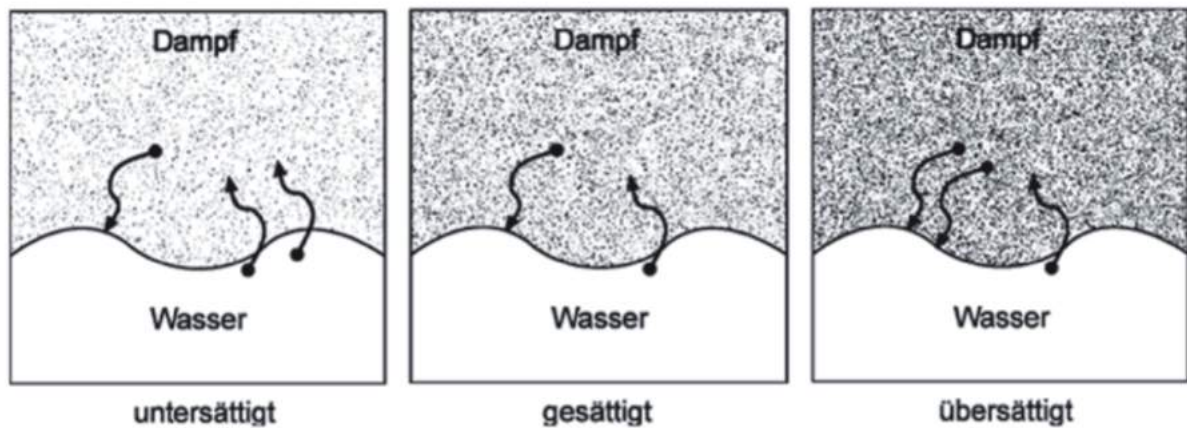


Abb. 2: Die verschiedenen Formen der Wasserdampfsättigung. [20]

Unter der Annahme des gesättigten Wasserdampfes weist dieser, je nach Temperatur, einen Sättigungsdampfdruck E auf. Dieser ist davon abhängig, ob sich der Dampf über Wasser (E_W) oder über Eis (E_E) befindet. Bei gegebener Temperatur kann der Dampfdruck nicht höher als der Sättigungsdampfdruck werden. Die in der Luft enthaltene Maximalmenge an Wasser hängt also nur von der Temperatur ab. Aus der Clausius-Clapeyron-Gleichung

$$\frac{dE_W}{dT} = \frac{L}{T \cdot \Delta V}$$

folgt mit der spezifischen Verdampfungswärme von Wasser L und der Differenz der spezifi-

schen Volumina im gasförmigen und im flüssigen Zustand ΔV , dass eine Temperaturerhöhung um 1 K eine bis zu 8 % höhere Luftfeuchte bewirken kann. Da diese Formel analytisch nur unter vereinfachten Annahmen gelöst werden kann, wurde für den Sättigungsdampfdruck über Wasser eine Reihe empirischer Formeln aufgestellt. Die Magnus-Formel, nach dem deutschen Physiker und Chemiker H. Magnus (1802-1870), beschreibt die Abhängigkeit des Sättigungsdampfdruckes in hPa von der Temperatur t in °C:

$$E_W(t) = 6,10708 \text{ hPa} \cdot \exp\left(\frac{17,08085 \cdot t}{234,17^\circ\text{C} + t}\right) \quad (1)$$

Da die Temperaturen über den Ozeanen, wo Wasserdampfsättigung auftreten kann, im Regelfall nicht 35 °C überschreiten, dürften 56,4 hPa den maximalen natürlichen Dampfdruck darstellen. Unter der Annahme des atmosphärischen Normaldrucks von 1013,25 hPa entspricht das etwa 5,6 % des Luftdruckes am Boden. Die Diskrepanz zu den Werten in %_{vol} kommt durch die unterschiedlichen Massen- und Volumeneigenschaften der verschiedenen atmosphärischen Gase zustande. [3][4]

2.2.1 Relative Luftfeuchtigkeit

Das Verhältnis zwischen aktuellem und maximalem Dampfdruck wird durch die Relative Feuchte RH (relative humidity) in % dargestellt:

$$RH = 100 \cdot \frac{e}{E_W(t)} = 100 \cdot \frac{E_W(\tau)}{E_W(t)} \quad (2)$$

Sie ist somit ein Maß des Sättigungsgrades der Luft, nicht aber deren Feuchtegehaltes. τ bezeichnet den Taupunkt in °C. Das ist die Temperatur, bei welcher der in der Luft enthaltene Wasserdampf bei isobarer Abkühlung anfängt zu kondensieren. [3][4]

2.2.2 Absolute Luftfeuchtigkeit

Betrachtet man Wasserdampf als ideales Gas, folgt für eine Wasserdampfmenge m_W unter dem Druck p_W bei der Temperatur T in K im Volumen V das ideale Gasgesetz:

$$p_W \cdot V = m_W \cdot R_W \cdot T$$

Mit dem Dampfdruck e und der Dichte $\rho_W = \frac{m_W}{V}$ folgt daraus:

$$e = \rho_W \cdot R_W \cdot T$$

Die Dichte des Wasserdampfes ρ_W wird auch als Absolute Feuchte a bezeichnet, welche ein direktes Maß des Wasserdampfgehaltes der Atmosphäre darstellt (vgl. Abb. 3). [3]

$$a = \rho_W = \frac{e}{R_W T} \quad (3)$$

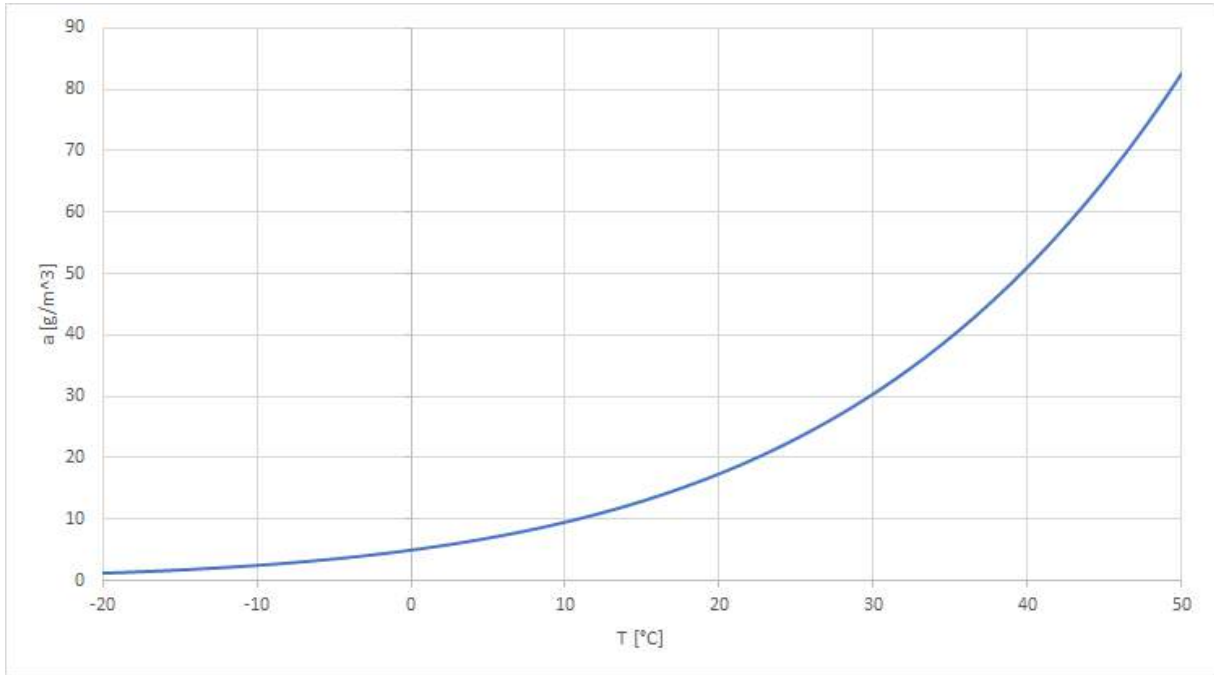


Abb. 3: Absolute Luftfeuchtigkeit von gesättigtem Wasserdampf in Abhängigkeit von der Temperatur.

2.2.3 Spezifische Feuchte und Mischungsverhältnis

Zum Vergleich des Feuchtigkeitsgehaltes von Luft in verschiedenen Höhen, bei unterschiedlichen Temperaturen und Luftdrücken wurden die Feuchtigkeitsmaße spezifische Feuchte S und Mischungsverhältnis M eingeführt.

Für ein bestimmtes Volumen beschreibt die spezifische Feuchte das Verhältnis zwischen der Dichte des Wasserdampfes und der der feuchten Luft:

$$S = \frac{\rho_W}{\rho_F}$$

Betrachtet man anstelle der Volumina Massen folgt daraus für die feuchte Gesamtluftmasse $m_F = m_T + m_W$ mit dem Luftdruck p und dem Dampfdruck e :

$$S = \frac{m_W}{m_F} = \frac{m_W}{m_T + m_W} = \frac{R_T}{R_W} \frac{e}{p - (1 - m_W/m_T) \cdot e}$$

Der Term $(1 - m_W/m_T)$ lässt sich dabei auf 0,378 bestimmen und da $0,378 e \ll p$ und $R_T/R_W = 0,622$, folgt als gute Näherung:

$$S \approx 0,622 \frac{e}{p} \quad (4)$$

Das Mischungsverhältnis ist im Gegensatz zur spezifischen Feuchte das Verhältnis der Dichte des Wasserdampfes zur Dichte der trockenen Luft:

$$M = \frac{\rho_W}{\rho_T}$$

Äquivalent folgt wieder:

$$M = \frac{m_W}{m_T} = 0,622 \frac{e}{p - e} \quad (5)$$

Da eine direkte Messung der Luft- und Dampfmassen sich in der Praxis als schwierig erweist, erfolgt die Bestimmung der Feuchtemaße meist indirekt über Druckmessungen. Unter Verwendung der idealen Zustandsgleichungen für trockene und feuchte Luft folgt:

$$(p - e)V = m_T R_T T \quad \text{und} \quad e \cdot V = m_W R_W T$$

Durch Umformen nach V und Gleichsetzen folgt mit $R_T/R_W = 0,622$ der bereits aus (5) bekannte Zusammenhang:

$$M = 0,622 \frac{e}{p - e}$$

Da die spezifische Feuchte und das Mischungsverhältnis dimensionslos und immer kleiner als 0,04 sind werden sie im Regelfall im Tausendfachen ihrer Zahlenwerte angegeben, also in $\frac{\text{g}}{\text{kg}}$ (jeweils Wasserdampf pro feuchter oder trockener Luft). [3][4]

3 Missionsplanung und -vorbereitung

Bevor ein Stratosphärenballon gestartet werden kann muss vieles vorbereitet werden. Dazu zählen neben Offensichtlichem, wie der Beschaffung des Ballons, der Auswahl der Experimente und der Bestimmung des Startpunktes, auch nicht ganz so Intuitives wie der Abschluss einer speziellen Luftfahrt-Halterhaftpflichtversicherung und der Antrag bei der Flugsicherung. Als sehr nützliches Tool, mit jeder Menge Hinweisen und Anregungen, ist hierbei das „Wetterballon Tutorial“¹ von Stratoflights zu erwähnen. Im Laufe des Tutorials wird Schritt für Schritt erklärt, was gemacht werden muss, sodass selbst interessierte Laien ohne größere Schwierigkeiten einen Wetterballon steigen lassen können. Neben dem Tutorial bietet die Firma auch einen Heliumrechner, mit dem die benötigte Menge Ballongas bei gewünschter Flughöhe und Sondenmasse berechnet werden kann, und eine Flugroutenprognose an, wodurch die Bergung des Ballons erleichtert wird. Die Prognose der Flugroute erfolgt aufgrund missionsspezifischer Parameter wie der Steiggeschwindigkeit, der maximalen Steighöhe (vorher mit oder für den Heliumrechner bestimmt) und dem Startplatz sowie aktueller Wetterdaten in den unteren Schichten der Atmosphäre. Das Prognosetool greift hierbei auf das „Global Forecast System“ (GFS) des US-amerikanischen Wetterdienstes NOAA zurück [14]. Dadurch kann im Vorfeld schon eine Einschätzung getroffen werden, wie weit entfernt der Ballon wieder auf dem Boden auftreffen könnte. Je nach Wetterlage kann das zwischen zehn und mehreren hundert Kilometern variieren. Außerdem bietet Stratoflights vom Spezialhandschuh für das Naturkautschukmaterial des Ballons bis hin zu Stratosphärenballon-Komplettsets alles an Hardware an, was für einen Ballonstart benötigt wird [15]. Lediglich das Ballongas oder Helium muss separat besorgt werden. Der Begriff „Ballongas“ steht hierbei für Helium mit einem Reinheitsgrad von etwa 95% [16].

Wir haben uns nach eingehender Recherche und der Überlegung des Selberbauens dazu entschieden, einen Teil unserer Hardware bei Stratoflights zu bestellen (vgl. Tab. 2). Als Payload des Ballons haben wir verschiedene Experimente entworfen, die im Laufe des Fluges stattfinden sollen. Das Primärexperiment besteht aus mit einer Photoemulsion beschichteten Glasplatten. Auf diesen soll durch kosmische Partikelstrahlung ausgelöste Sekundärstrahlung nachgewiesen werden. Das zweite Experiment besteht aus einem selbst-programmiertem Arduino, welcher mittels externer Sonorik Lufttemperatur, -feuchtigkeit und -druck sowie den Ozongehalt der Umgebungsluft misst. Der erarbeitete Code ist im Anhang einsehbar (vgl. Kapitel 8.1, Abb. 12). Parallel dazu zeichnet der Datenlogger von Stratoflights Luft- und Boardtemperatur, Luftdruck und -feuchtigkeit sowie Position, Steig- und Fluggeschwindigkeit auf. Als Passivexperimente sind eine Festplatte, eine CD und eine Filmrolle eingeplant, um zu untersuchen, in wie weit deren Speicherzellen durch hochenergetische Partikelstrahlung oder hypothetische magnetische Monopole in der unteren Atmosphäre beeinflusst werden.

¹<https://www.stratoflights.com/tutorial/wetterballon-tutorial/>

Stratoflights	Separat
Stratosphärenballon mit 1,6 kg Traglast	Helium
Fallschirm mit 2,5 kg Traglast	Arduino
Datenlogger	Datashield für Arduino
GPS-Tracker	Ozonsensor für Arduino
Battery-Pack für die Actioncam	BME-280 Multisensor für Arduino
Handschuhe	Wärmepads
Spezialschnur	Actioncam
Styroporkiste inkl. Flügel	Batterien
	Gewebeband
	Kabelbinder
	SIM-Karte für Datenlogger

Tabelle 2: Benötigtes Material für die Stratosphärenballonmission.

Nach der Lieferung aller Komponenten muss der Code für den Arduino geschrieben und getestet und aus dem Styroporkasten eine Sonde gebaut werden. Dazu werden Löcher in die Wände und den Boden geschnitten. Die Öffnungen, durch die die Sensoren des Arduino und des Datenloggers Kontakt zur Umgebungsluft haben, werden so klein wie möglich gehalten, die Öffnung für die Actioncam jedoch großflächig ausgeschnitten und danach mit einer festen Pappe verschlossen (vgl. Abb. 4, unten links). In diese wird ein Loch in der Größe der Kameralinse geschnitten, damit die Sonde möglichst luftdicht bleibt. Da die Temperatur der Umgebungsluft im Verlauf des Fluges bis zu $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ erreicht, werden zum Schutz der elektronischen Komponenten zwei Wärmepads mit in die Sonde gelegt. Hierfür benutzen wir Einmalpads, welche sich durch den Kontakt mit Sauerstoff erwärmen und für mehrere Stunden warm bleiben. Unsere erste Überlegung, normale Taschenwärmer mit unterkühlter Flüssigkeit zu nutzen, haben wir aufgrund des höheren Gewichts und der deutlich kürzeren Wärmedauer verworfen. Da der Großteil der Sensorik unter der Sonde verbaut ist, werden noch kleine Pappfüße entworfen. Grund dafür ist, dass die Sensoren nicht beschädigt werden sollen, wenn die Sonde auf dem Boden steht oder auf harter Oberfläche landet. Alle Öffnungen und Pappflächen werden zum Schutz vor Wettereinflüssen mit Gewebeband abgeklebt. Außerdem werden zwei Flügel senkrecht an den Seiten der Sonde angebaut (vgl. Abb. 4, oben), um diese während des Fluges zu stabilisieren und vor unkontrollierter Rotation zu schützen. Im selben Bild ist in der vorderen Wand der Sonde der Ozonsensor zu erkennen. Im vorletzten Schritt muss der Fallschirm am Deckel der Sonde befestigt werden. Dazu bietet Stratoflights ein spezielles Plastikband an, welches explizit für den Gebrauch bei Stratosphärenballons entwickelt wurde. Nach gesetzlichen Vorgaben darf die Reißfestigkeit dieser Schnur 230 N nicht übersteigen, damit sie im Falle einer Kollision mit einem Flugzeug oder Hubschrauber zuverlässig reißt und keinen größeren Schaden anrichtet [17]. Für dieses Spezialband müssen vier kleine Löcher in die Ecken des Deckels gebohrt werden, durch welche die Schnur gefädelt werden kann. Um eine bessere Stabilität der Sonde zu erreichen, werden zwei Schnüre durch den Sondendeckel gezogen, sodass diese oberhalb der Sonde mit einer etwa 10 m langen

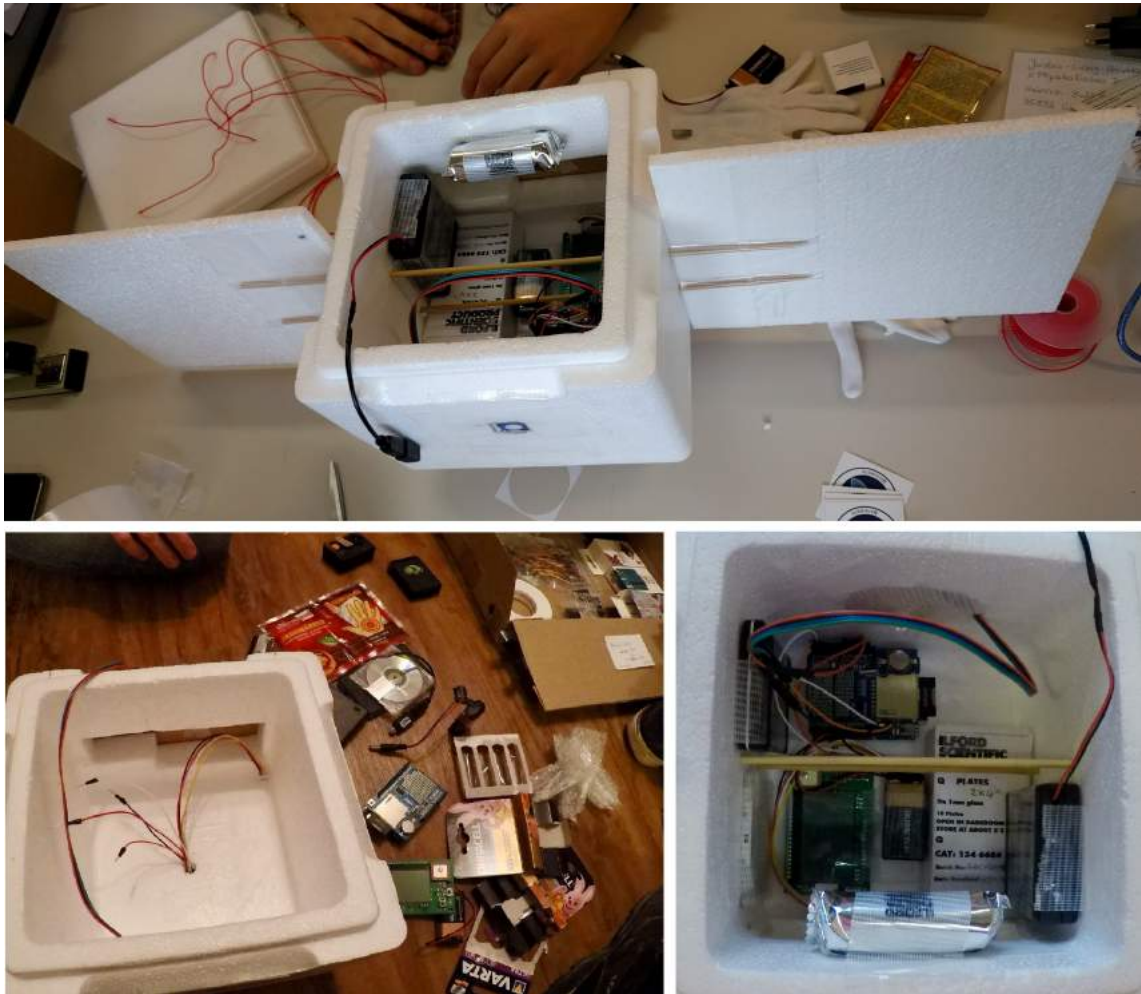


Abb. 4: Selbstgebaute Sonde im Rohbau (unten links), und fertig bestückt (oben und rechts).

Schnur mit dem Fallschirm verknüpft werden können. Zuletzt muss noch ein Zettel mit Kontaktinformationen auf der Sonde angebracht werden, unter der ein eventueller Finder den Besitzer erreichen kann. Da alle Seiten der Sonde durch Kamera, Ozonsensor und die beiden Flügel verbaut sind, kleben wir diesen auf den Deckel. Es empfiehlt sich, den Zettel zu laminieren, damit dieser vor Wettereinflüssen geschützt ist.

Da die maximale Steighöhe direkt vom Gewicht der Sonde abhängt, ist darauf zu achten dieses möglichst gering zu halten. Gleichzeitig ist sicherzustellen, dass der Ballon das gewünschte Gewicht der Payload überhaupt heben kann. Wir haben uns für einen Ballon entschieden, der bis zu 1,6 kg heben kann. Diese Wahl erweist sich als passend, da die Sonde ohne Fallschirm und Verbindungsschnur ein Gewicht von etwa 1,2 kg auf die Waage bringt (vgl. Tab. 3).

Glasplatten	ca. 300 g	Battery-Pack	106 g	Kamera	61 g
Styroporsonde	188 g	Datenlogger	93 g	Flügel	28 g
Festplatte	124 g	Wärmepads	69 g	Filmrolle	26 g
Arduino inkl. Sensorik	119 g	GPS-Tracker	64 g	Mini-CD	16 g
				Summe	1194 g

Tabelle 3: Gewicht der einzelnen Komponenten der Sonde.

4 Missionsdurchführung

Der für Mitte Oktober 2020 geplante Start musste wegen Schwierigkeiten bei der Lieferung der speziell angefertigten Photoemulsionsplatten und aufgrund schlechter Wetterbedingungen verschoben werden. Der Ballon startete infolgedessen am 06.11.2020.

Die letzten Vorbereitungen bestehen darin, alle elektronischen Komponenten in der Sonde in Betrieb zu nehmen, den Deckel mit reichlich Gewebepack an der Sonde zu befestigen und diese mittels der Spezialschnur mit dem Fallschirm zu verknoten. Über dem Fallschirm wird der Ballon, nach der Befüllung mit Helium, ebenfalls mit der Spezialschnur befestigt (vgl. Abb. 5). Das Befüllen muss über einen Druckminderer erfolgen, welcher den Flaschendruck von 200 bar auf den Umgebungsdruck reduziert. An diesem Druckminderer ist eine Druckluftpistole angebracht, mit welcher das Helium in den Ballon gefüllt wird. Nachdem die vorher berechnete Menge an Helium die Flasche verlassen hat, wird das Ende des Ballons umgeknickt und mit Panzerband und Kabelbindern verschlossen. Außerdem werden Fallschirm und Sonde mittels des Spezialbandes im Knick des Ballonhalses befestigt.

Der daraufhin freigegebene Ballon soll in diesem Fall mit etwa $4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ steigen. Da der Ballon dies nicht tut, ist offensichtlich, dass nicht die gesamte Menge an Helium im Ballon gelandet ist. Dies hat eine Kollision der Sonde mit diversen universitären Gebäuden zur Folge. Aufgrund der langen Verbindungsschnüre zwischen den einzelnen Komponenten übersteht der Ballon den Start jedoch unbeschadet und das Gespann kann sicher auf den Boden zurückgeholt werden. Nachdem der Ballon geöffnet, mit weiterem Helium befüllt und wieder verschlossen ist, wird ein neuer Versuch gestartet. Dieser ist erfolgreich.

Da die genaue Menge des Heliums im Ballon nicht mehr bekannt ist, müssen für die Flugroutenprognose Vermutungen angestellt werden. Wir entscheiden uns dazu mit der anfangs kalkulierten Menge zu rechnen, in die ungefähre Richtung zu fahren und unseren Kurs gegebenenfalls kurzfristig anzupassen. Aufgrund dessen fahren wir in Richtung Siegen. Über den sich in der Sonde befindenden GPS-Tracker können wir den Ballon letztlich in einer Waldfläche in der Nähe von Siegen orten. Am Standort angekommen stellt sich heraus, dass er in der Krone einer, am Rande einer Lichtung stehenden, toten Fichte hängengeblieben ist. Mit freundlicher Hilfe der örtlichen Freiwilligen Feuerwehr und eines befreundeten Gartenbauunternehmens kann die Sonde aus dem etwa 30 m hohen Baum geborgen werden. Von Vorteil ist hierbei, dass die Sonde 10 m unterhalb des, sich in der Baumkrone verfangenen, Fallschirms hängt (vgl. Abb. 7).

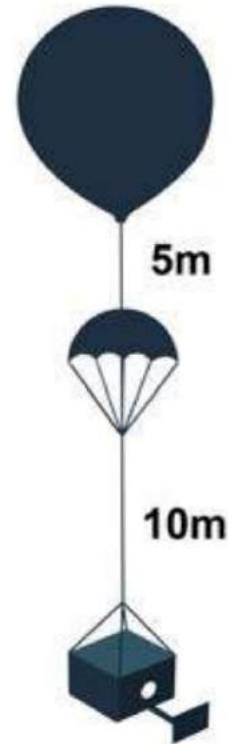


Abb. 5: Darstellung des Aufbaus von Ballon, Fallschirm und Sonde. [21]



Abb. 6: Bilder vor dem Start: Befestigung der Sonde am Ballon (oben links), Ballon kurz vor dem ersten Start (oben rechts), Ballon am Unigebäude hängend (unten links) und letzte Vorbereitungen für den zweiten Start (unten rechts).



Abb. 7: Bilder nach dem Start: Ballon kurz nach dem Start in der Luft (oben links), im Baum hängend (rechts) mit Fallschirm (roter Pfeil) und Sonde (weißer Pfeil) und Bergung der Sonde (unten links) mit Baumkletterer (roter Pfeil) und Sonde (weißer Pfeil).

5 Auswertung

Die anfänglichen Kollisionen der Sonde mit Gebäuden der Universität haben Schäden unterschiedlichen Ausmaßes verursacht. Als weniger kritisch sind dabei zu beurteilen, dass eine Ecke eines der Flügel abgebrochen ist und dass sich die Kamera leicht in ihrer Befestigung gelöst hat und dadurch teilweise die Pappblende am Rand des Bildes sichtbar ist (vgl. Kap. 8.3). Gravierender ist jedoch, dass sich die Steckverbindungen der Arduinosensoren gelöst haben. Da diese ohne Spannungsversorgung keine Daten aufzeichnen können, liegen vom Arduino nur Daten für die Zeit vor dem Crash vor. Damit fallen neben den Daten zu den Luftparametern Temperatur, Druck und Feuchtigkeit auch die Ozonmessungen weg. Da wir Lufttemperatur, -druck und -feuchtigkeit jedoch auch mit dem Datenlogger von Stratoflights aufgezeichnet haben, liegen hierfür trotzdem Daten zur Auswertung vor.

5.1 Flugparameter

Der Flug dauert nach dem zweiten Start 185 Minuten und der Ballon erreicht nach 140 min seine Maximalhöhe von 36,64 km (vgl. Abb. 13 im Anhang). Die Steiggeschwindigkeit liegt beim Aufstieg bei etwa $4 - 6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ und fällt nach dem Platzen des Ballons kurzfristig auf $-62 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ (vgl. Abb. 14 im Anhang). Im Verlauf des Sinkfluges bremst der Fallschirm die Sonde auf bis zu $-5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ herunter. Die exponentielle Abnahme der Fallgeschwindigkeit kommt durch den exponentiell wachsenden Luftdruck zustande, durch welchen der Fallschirm seine Bremswirkung erzielt. Da der Ballon keinen Antrieb hat, wird die horizontale Geschwindigkeit durch den Wind verursacht. Dieser variiert im Verlauf des Fluges je nach Steighöhe. Hier sind zwei Maxima erkennbar. Das erste liegt im Jetstream, kurz unter der Tropopause, in 10 km Höhe mit Windgeschwindigkeiten von $140 \frac{\text{km}}{\text{h}}$, das zweite auf der Platzhöhe von etwa 36,5 km mit $158 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ (vgl. Abb. 15 und Abb. 16 im Anhang). Dieser Windverlauf zeigt deutlich, dass die Luft in der unteren Stratosphäre im Vergleich zur Luft in der Troposphäre kaum horizontale Bewegung aufweist.

5.2 Lufttemperatur

Im Inneren der Sonde bewegt sich die Temperatur im Bereich von $3 - 33,625^\circ\text{C}$ (vgl. Abb. 17 im Anhang). Damit liegt sie innerhalb der zulässigen Betriebstemperatur der genutzten Komponenten von $-20 - 85^\circ\text{C}$. Unsere interne Heizung durch die Einwegtaschenwärmer war folglich erfolgreich. Die Außentemperatur bewegt sich im Laufe des Aufstieges zwischen $-48,125$ und $7,75^\circ\text{C}$ und während des Abstieges zwischen $-58,125$ und $9,5^\circ\text{C}$ (vgl. Abb. 17 im Anhang). Damit ist sie beim Aufstieg etwa 10°C wärmer als erwartet, aber der qualitative Verlauf der Temperatur über die Höhe (vgl. Abb. 18 im Anhang) passt mit dem theoretischen Modell (vgl. Abb. 1 in Kapitel 2.1) überein. Die Tropopause lässt sich auf einer Höhe von etwa 12,5 km bestimmen und die Erwärmung im Laufe der Stratosphäre ist auch sehr gut sichtbar.

5.3 Luftdruck

Der gemessene Luftdruck fällt exponentiell mit der Höhe ab. Am Boden beträgt er 1015,9 hPa, am höchsten Punkt nur 4,12 hPa (vgl. Abb. 19 im Anhang). Die Betrachtung des Luftdruckes über die Flughöhe bei logarithmischer Skalierung des Druckes (vgl. Abb. 20 im Anhang) bestätigt den exponentiellen Zusammenhang durch den fast linearen Verlauf der Kurve. Außerdem sind Auf- und Abstiegskurve wie erwartet fast deckungsgleich zueinander, da der Luftdruck, im Gegensatz zur Windgeschwindigkeit oder der Luftfeuchte, keiner starken lokalen Veränderung unterliegt.

5.4 Luftfeuchtigkeit

Die vom Datenlogger gemessene relative Feuchte der Umgebungsluft der Sonde beträgt beim Start 64,8 % und fällt im Laufe des Aufstieges auf 13,45 %, bevor sie in 4,4 km Höhe wieder auf 31,6 % steigt (vgl. Abb. 8 und Abb. 9). Im oberen Bereich der Troposphäre, in etwa 10 km Höhe, fällt die Luftfeuchtigkeit auf 0,4 % und steigt erst wieder im Abstieg ab 8,5 km auf bei 5,8 km 28,3 %. Zwischen 5 und 2 km Höhe fällt die relative Luftfeuchtigkeit wieder auf 0,4 %, bevor sie kurz vor der Landung auf 46,2 % steigt. Die Peaks in 4,4 km und 5,8 km sind vermutlich auf Wolken zurückzuführen, durch die die Sonde geflogen ist.

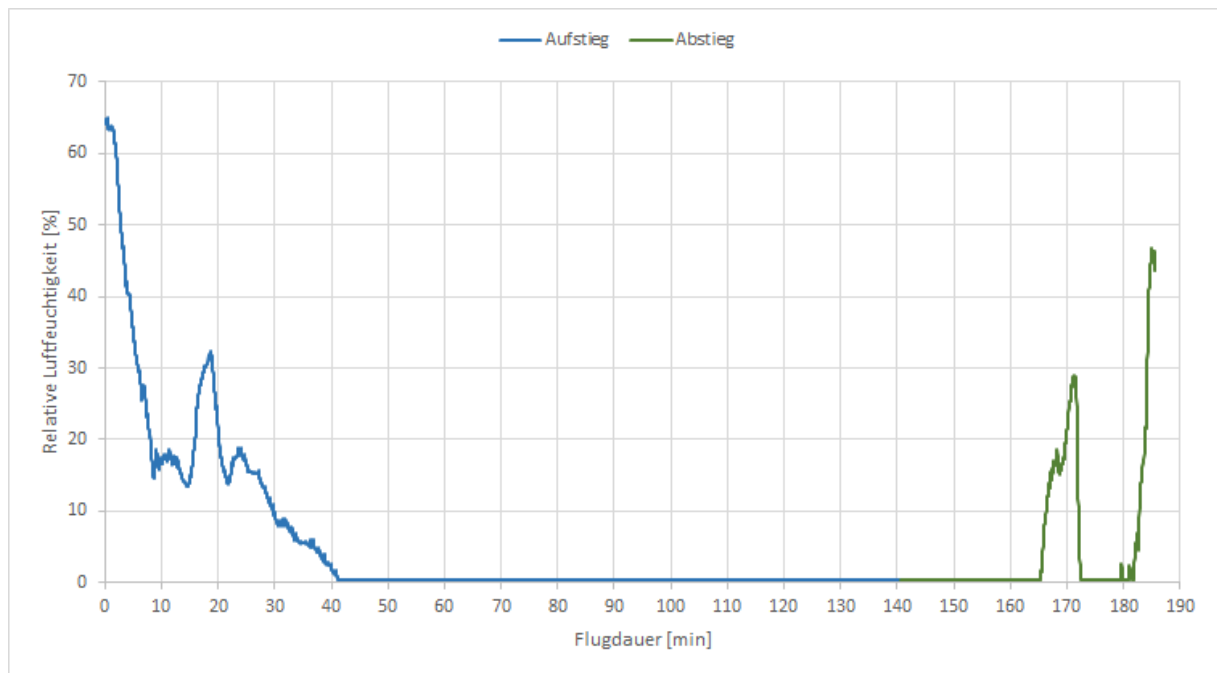


Abb. 8: Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit über die Flugdauer.

Um eine quantitative Aussage über den Wasserdampfgehalt der Luft im Verlauf des Fluges zu bekommen, kann die gemessene relative Luftfeuchtigkeit in die absolute Luftfeuchtigkeit umgerechnet werden. Dafür folgt aus den Formeln für den temperaturabhängigen Sättigungsdampfdruck $E_W(t)$ (1), die relative Luftfeuchtigkeit RH (2) und der absoluten Luftfeuchtigkeit a (3) mit der Gaskonstanten von Wasserdampf $R_W = 461,6 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$ ²:

²[2], S. 151

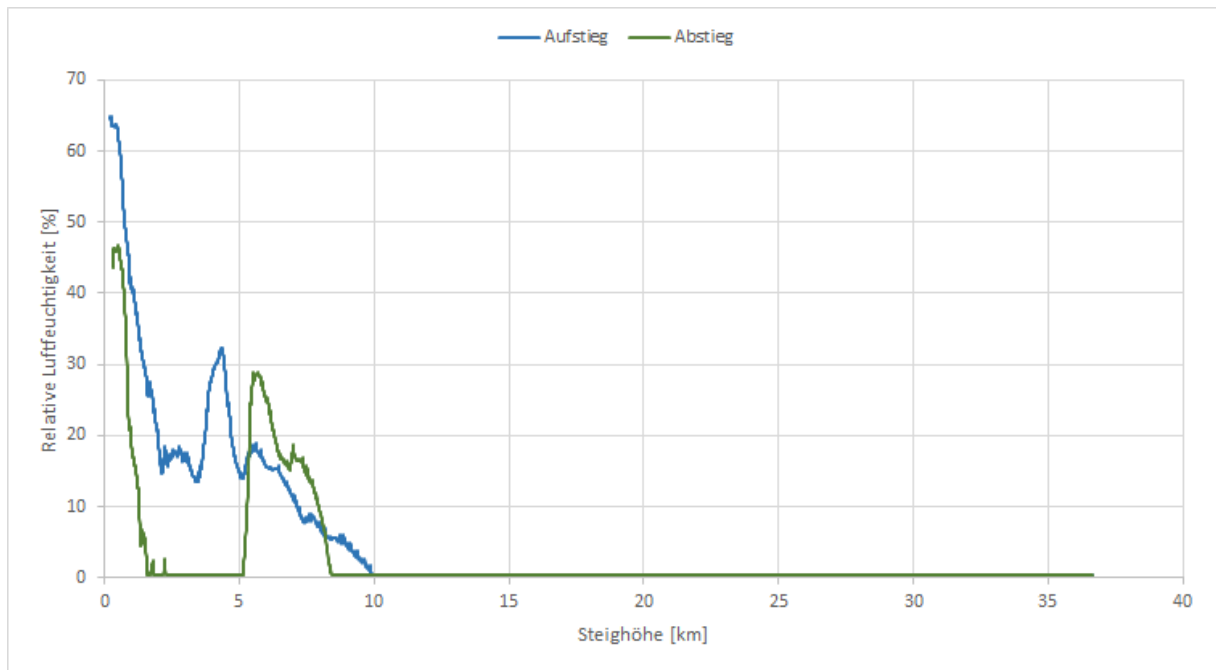


Abb. 9: Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit über die Flughöhe.

$$a = \frac{RH \cdot E_W(t)}{100 \cdot R_W \cdot T} = \frac{RH \cdot 6,10708 \text{ hPa} \cdot \exp\left(\frac{17,08085 \cdot t}{234,17^\circ\text{C} + t}\right)}{100 \cdot 461,6 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot (273,15 \text{ K} + t \frac{\text{K}}{^\circ\text{C}})}$$

Im Plot der absoluten Luftfeuchtigkeit über die Steighöhe (vgl. Abb. 10) ist deutlich zu sehen, dass der höhere Peak in der relativen Luftfeuchte auf 5,8 km Höhe beim Abstieg auf die im Vergleich zum Aufstieg um etwa 8 °C kältere Luft und damit den niedrigeren Sättigungsdampfdruck zurückzuführen ist.

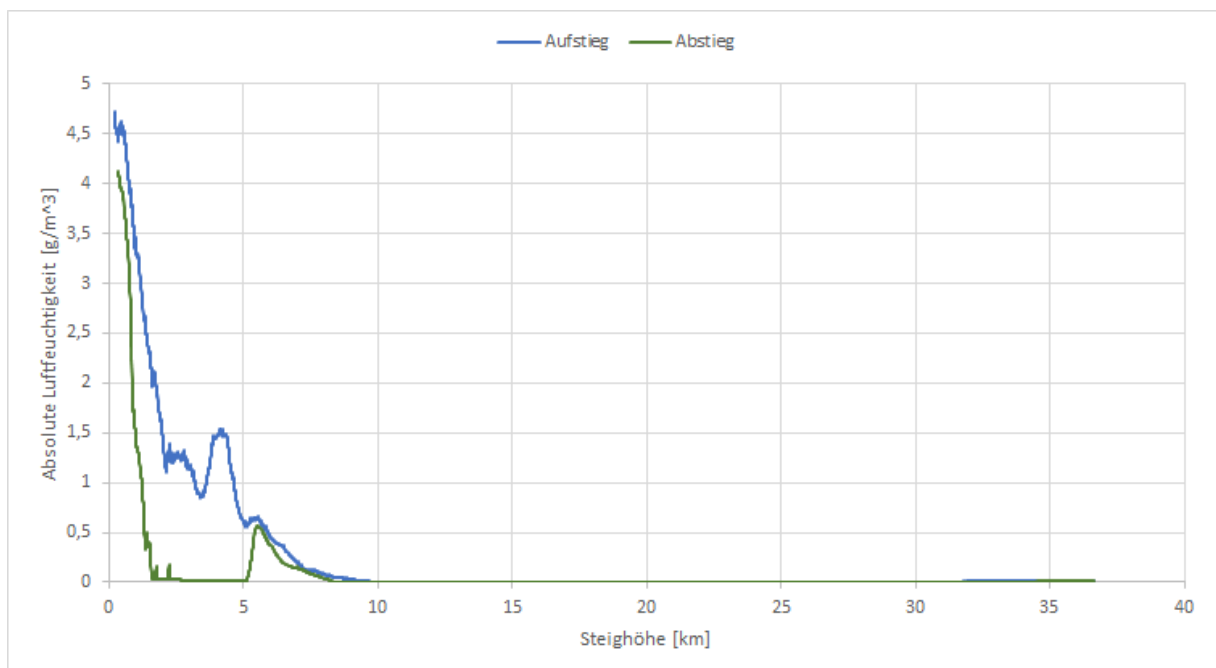


Abb. 10: Verlauf der absoluten Luftfeuchtigkeit über die Steighöhe.

Ab etwa 32 km Höhe steigt die absolute Luftfeuchtigkeit ganz leicht an. Da diese jedoch in Kilogramm Wasser pro Kubikmeter Luft gemessen wird und der Luftdruck und damit auch die Atmosphärendichte mit der Höhe deutlich abnimmt, befindet sich in einem Kubikmeter auf 32 km Höhe deutlich weniger Luft als in einem Kubikmeter auf Meereshöhe. Um diese Diskrepanz auszugleichen und Luftfeuchtigkeit in den verschiedenen Höhen direkt miteinander vergleichen zu können, werden die gemessenen Feuchtigkeitswerte in das Mischungsverhältnis von Wasserdampf zu trockener Luft umgerechnet. Aus den Formeln für den temperaturabhängigen Sättigungsdampfdruck (1), die relative Feuchtigkeit (2) und das Mischungsverhältnis (5) folgt:

$$M = 0,622 \frac{e}{p - e} = 0,662 \left(\frac{100 p}{RH \cdot 6,10708 \text{ hPa} \cdot \exp\left(\frac{17,08085 \cdot t}{234,17^\circ\text{C} + t}\right)} \right)^{-1}$$

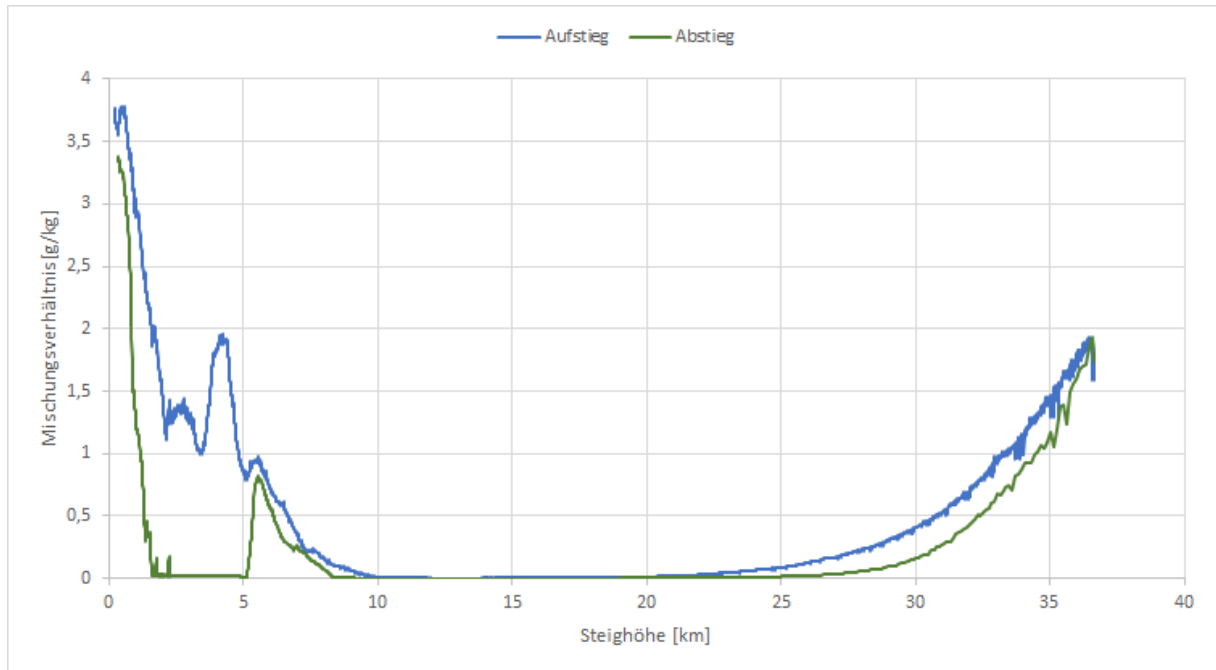


Abb. 11: Verlauf des Mischungsverhältnisses über die Steighöhe.

Im Verlauf des Mischungsverhältnisses über die Steighöhe (vgl. Abb. 11) fällt auf, dass diese ab etwa 20 bis 25 km Höhe wieder steigt. Dies ist auf die in diesen Höhen dünne Luft und den sinkenden Anteil an Ozon zurückzuführen. Außerdem steigen die Temperaturen in dieser Höhe wieder, was die Menge an Wasserdampf begünstigen könnte.

6 Fazit

Insgesamt war die Ballonmission ein Erfolg. In einigen Punkten besteht jedoch noch Verbesserungbedarf. So muss das Einfüllen des Heliums in den Ballon verbessert werden, damit die eingefüllte Menge bekannt ist und so der Landeplatz und die Flugdauer besser prognostiziert werden können. Außerdem verhindert dies weitere Zusammenstöße von Sonden mit Gebäuden, welche potentiell gefährlich sein können. Eine Möglichkeit zur Bestimmung der Heliummenge im Ballon wäre, dass sich eine Person mit dem leeren Ballon auf eine Personenwaage stellt. Über die Zeit des Füllens hinweg kann sich diese Person immer wieder auf die Waage stellen. Durch die Auftriebskraft des Heliums wird sich das Gewicht der Person verringern, wodurch sich die Menge des eingefüllten Heliums berechnen lässt. Für den Einfüllvorgang an sich ist es wichtig, dass das Helium immer nach oben strömt. Wir haben beim Befüllen des Ballons anfangs nach unten „geblasen“, wodurch vermutlich eine signifikante Mengen an Helium verloren gegangen ist. Sinnvoll wäre hier die Verwendung eines Schlauches ohne Pistole, da diese nicht in den Ballon hineingesteckt werden kann. Hat der Schlauch hingegen ein offenes Ende, kann dieses komplett in den Ballon eingeführt und die Öffnung des Ballons fest an den Schlauch gedrückt werden. Dadurch dürfte die Menge des Heliums, welche nicht in den Ballon gelangt, deutlich reduziert werden. Stratoflights hat zum Vorgang des Befüllens und Verschließens des Ballons ein separates Videotutorial auf YouTube hochgeladen [18]. Es bietet sich an die Anleitungen von Stratoflights gründlich zu studieren, auch wenn die Hardware nicht dort gekauft sein sollte. Weiterhin sollte sich für einen weiteren Start eine Möglichkeit überlegt werden, die Pins der Arduinosensoren zu befestigen. Ein einfaches Festkleben der Steckverbindungen mit Isolierband war nicht ausreichend. Allgemein sollte die Sonde vor einem wiederholten Start geöffnet und alle Komponenten auf Funktionalität überprüft werden! Außerdem ist es sinnvoll, wenn es vom Gewicht her realisierbar ist, auf Redundanz zu setzen.

Die Redundanz der Luftparametermessung hatte in diesem Fall zur Folge, dass trotz des Ausfalls des Arduinos Messwerte zur Auswertung gesammelt wurden. Diese bestätigen deutlich die vorher besprochene Theorie. Besonders interessant sind die Werte des Mischungsverhältnisses, da diese im oberen Bereich der Stratosphäre noch einmal deutlich ansteigen und auf ein Mischungsverhältnis von Wasserdampf zu trockener Luft hinweisen, welches halb so groß ist wie das an der Erdoberfläche. Durch reine Betrachtung der gemessenen relativen Feuchtigkeit kann dieser Schluss nicht gezogen werden.

Aufgrund der geringen Planungs- und Vorlaufzeit von wenigen Monaten und dem relativ geringen finanziellen Aufwand von etwa 1000 € (je nach Experimenten) ist ein Stratosphärenballon eine gute Möglichkeit zur Simulation einer Weltraummission. Von ausführlicher Planung, über Antragstellung, bis hin zur Durchführung und Auswertung von Daten verfügt sie über dieselben Kernelemente wie eine Weltraummission und das bei deutlich geringerem Risiko. Jeder Person, die im späteren Berufsleben einmal solche Missionen durchführen möchte, sei diese Möglichkeit Erfahrungen zu sammeln sehr empfohlen.

7 Literatur- und Quellenverzeichnis

Textquellen

- [1] https://de.wikipedia.org/wiki/Raumschiff_Enterprise - Letzter Abruf: 10.07.2021
- [2] HÄKEL, H.: *Meteorologie*. 8. Auflage, Eugen Ulmer (2016), S. 17-23, S. 57-60, S. 390-394.
- [3] KLOSE, B.: *Meteorologie - Eine interdisziplinäre Einführung in die Physik der Atmosphäre*. 3. Auflage, Springer (2016), S. 147-156.
- [4] SIMMER, C.: *Einführung in die Meteorologie - Teil II: Meteorologische Elemente*, Rheinische Friedrich-Universität Bonn (SS 06/WS 06/07), F. 5-19.
<https://www2.meteo.uni-bonn.de/mitarbeiter/rindau/download/pdf/EinfidMet-II-4.pdf> - Letzter Abruf: 30.06.2021
- [5] Wetter- und Klimalexikon des Deutschen Wetterdienstes. Stichwort: *Erdatmosphäre*.
<https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?sessionId=DE0EACD429161AD5CD3D3741B5DFDE80.live31093?lv2=100652&lv3=100744>
Letzter Abruf: 06.06.2021
- [6] Wetter- und Klimalexikon des Deutschen Wetterdienstes. Stichwort: *Troposphäre*.
<https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=102672&lv3=102820> - Letzter Abruf: 06.06.2021
- [7] Wetter- und Klimalexikon des Deutschen Wetterdienstes. Stichwort: *Stratosphäre*.
<https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=102248&lv3=102632> - Letzter Abruf: 06.06.2021
- [8] Wetter- und Klimalexikon des Deutschen Wetterdienstes. Stichwort: *Mesosphäre*.
<https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=101640&lv3=101728> - Letzter Abruf: 06.06.2021
- [9] Wetter- und Klimalexikon des Deutschen Wetterdienstes. Stichwort: *Thermosphäre*.
<https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=102672&lv3=102756> - Letzter Abruf: 06.06.2021
- [10] Wetter- und Klimalexikon des Deutschen Wetterdienstes. Stichwort: *Exosphäre*.
<https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=100652&lv3=100778> - Letzter Abruf: 06.06.2021
- [11] Wetter- und Klimalexikon des Deutschen Wetterdienstes. Stichwort: *Magnetosphäre*.
<https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=101640&lv3=101696> - Letzter Abruf: 06.06.2021

- [12] Wetter- und Klimalexikon des Deutschen Wetterdienstes. Stichwort: *Luftfeuchte*.
<https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?nn=103346&lv2=101518&lv3=101616> - Letzter Abruf: 25.06.2021
- [13] Wetter- und Klimalexikon des Deutschen Wetterdienstes. Stichwort: *Wasserdampf*.
<https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=102936&lv3=103054> - Letzter Abruf: 25.06.2021
- [14] Flugroutenberechnung von Stratoflights.
<https://www.stratoflights.com/tutorial/flugroutenvorausberechnung/>
Letzter Abruf: 01.07.2021
- [15] Stratoflights Onlineshop.
<https://www.stratoflights.com/shop/> - Letzter Abruf: 01.07.2021
- [16] Tyczka Industrie-Gase: Datenblatt Ballongas.
<https://media.bahag.cloud/m/728636/1.pdf> - Letzter Abruf: 01.07.2021
- [17] STRATOFLIGHTS: *Tipps & Tricks für einen Ausflug in die Stratosphäre*, S. 11.
Exklusives E-Book, welches durch Kauf des Wetterballon-Komplettsets von Stratoflights erworben werden kann.
- [18] Wie befüllt man einen Wetterballon? - Videotutorial von Stratoflights.
https://www.youtube.com/watch?v=dNnj4z_q-TY - Letzter Abruf: 10.07.2021

Abbildungsquellen

- [19] HÄKEL, H.: *Meteorologie*. 8. Auflage, Eugen Ulmer (2016), S. 58.
- [20] KLOSE, B.: *Meteorologie - Eine interdisziplinäre Einführung in die Physik der Atmosphäre*. 3. Auflage, Springer (2016), S. 148.
- [21] STRATOFLIGHTS: *Tipps & Tricks für einen Ausflug in die Stratosphäre*, S. 11.
Exklusives E-Book, welches durch Kauf des Wetterballon-Komplettsets von Stratoflights erworben werden kann.

8 Anhang

8.1 Ardiuno Code

```

Baßn_21
#include <DFRobot_OzoneSensor.h>
#include <Seed_BME280.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <Wire.h>
#include "RTClib.h"

#define COLLECT_NUMBER 20 // collect number, the collection range is 1-100
#define Ozone_IICAddress ADDRESS_3
/* IIC slave Address, The default is ADDRESS_3
   ADDRESS_0      0x70 // iic device address
   ADDRESS_1      0x71
   ADDRESS_2      0x72
   ADDRESS_3      0x73
*/

const int chipSelect = 10; //10 is default by shield, but normally on Pin 4

DFRobot_OzoneSensor Ozone;
BME280 bme280;
RTC_PST307 rtc;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  delay(3000);
  Serial.println("Initializing SD card...");
  if (!SD.begin(chipSelect)) {
    Serial.println("SD Card error");
    return;
  }
  Serial.println("card initialized");
  if (!rtc.begin()) {
    Serial.println("No RTC found");
  } else {
    Serial.println("RTC clock found");
  }
  if (!rtc.isrunning()) {
    Serial.println("RTC is not configured");
  }

  if (!Ozone.begin(Ozone_IICAddress)) {
    Serial.println("I2c device number error!");
    delay(1000);
  } else {
    Serial.println("I2c connect success!");
  }
  /* Set iic mode, active mode or passive mode
     MEASURE_MODE_AUTOMATIC // active mode
     MEASURE_MODE_PASSIVE   // passive mode
  */
  Ozone.setModes(MEASURE_MODE_AUTOMATIC); // MUSS GGF NOCH UMGESTELLT WERDEN!

  if (!bme280.init()) // Wenn keine Daten vom BME abgefragt werden können...
  {
    Serial.println("FEHLER beim BME!"); // ...dann soll eine Fehlermeldung ausgegeben werden.
  }
}

void loop() {
  write_all_data(get_time(), String(bme280.getTemperature()), String(bme280.getPressure()), String(bme280.getHumidity()), String(Ozone.ReadOzoneData(COLLECT_NUMBER)));
  //Temp in °C, Druck in Pa, Feuchtigkeit in %, Ozon in ppb
  Serial.println("");
  delay(30000);
}

String get_time() { //Read Time from RTC
  String timestring;
  DateTime now = rtc.now();
  /*
  timestring = now.day();
  timestring += "-";
  timestring += now.month();
  timestring += "-";
  timestring += now.year();
  timestring += " ";
  */
  timestring += now.hour() + "-";
  timestring += now.minute() + "-";
  timestring += now.second();
  //Serial.println(timestring);
  return(timestring);
}

void write_all_data(String timestring, String temp, String pressure, String humidity, String ozone) { //Write Temp to SD card
  String dataString = timestring + ", " + temp + ", " + pressure + ", " + humidity + ", " + ozone;
  File dataFile = SD.open("Data.csv", FILE_WRITE);
  if (dataFile) {
    dataFile.println(dataString);
    dataFile.close();
    Serial.println(dataString);
  } else {
    Serial.println("error writing Data.txt");
  }
}

```

Abb. 12: Arduino Code.

8.2 Messwertdiagramme

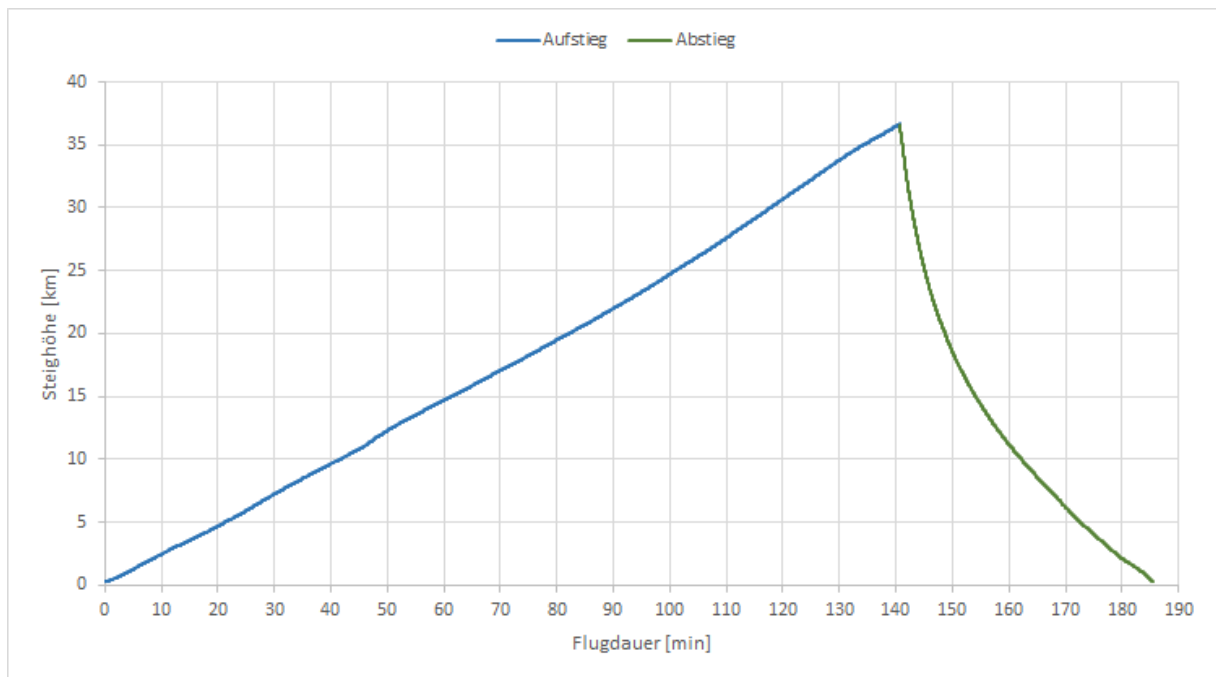


Abb. 13: Verlauf der Steighöhe über die Flugdauer.

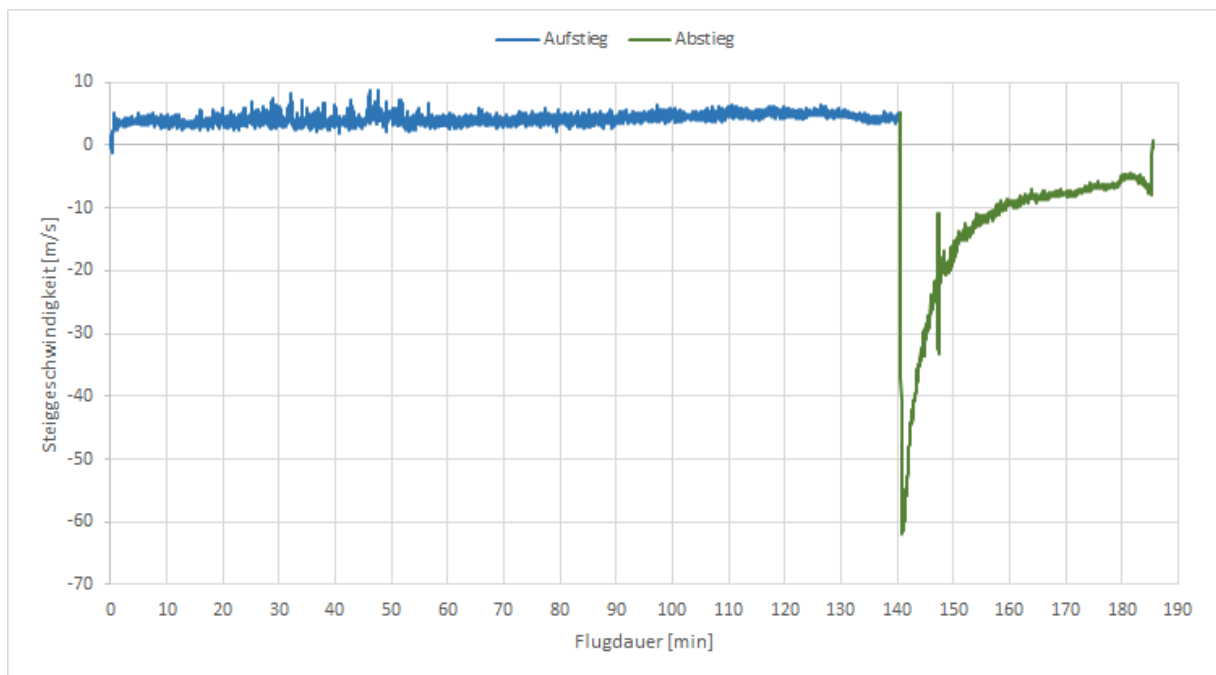


Abb. 14: Verlauf der vertikalen Steiggeschwindigkeit über die Flugdauer.

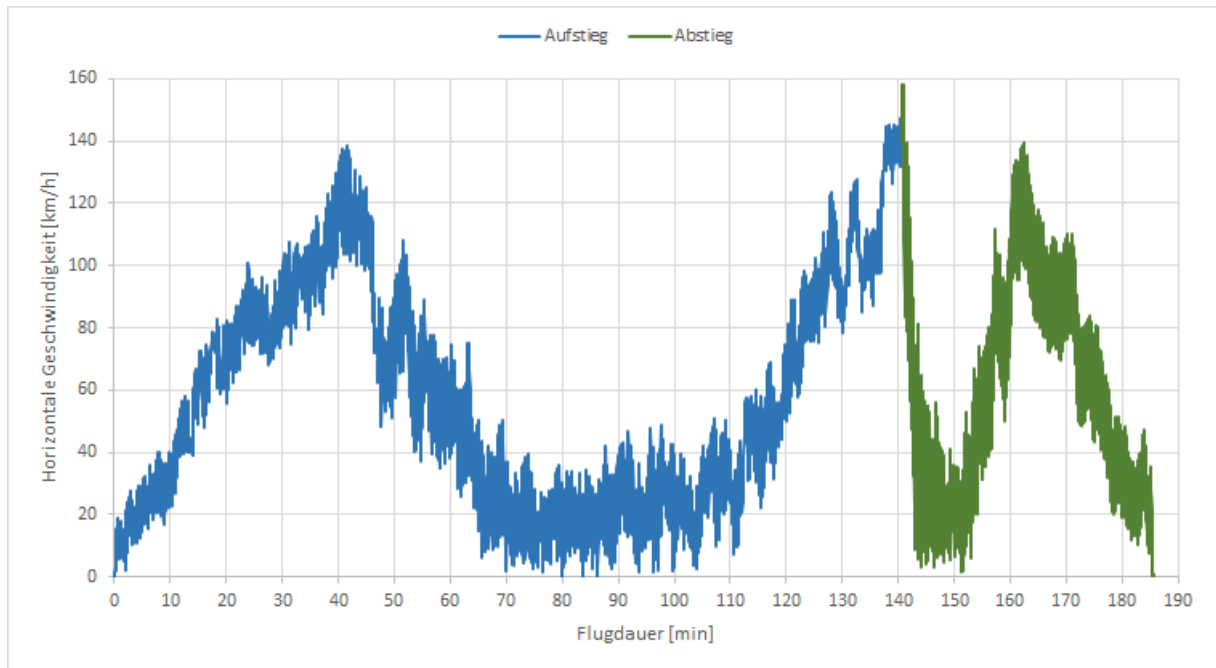


Abb. 15: Verlauf der horizontalen Geschwindigkeit über die Flugdauer.

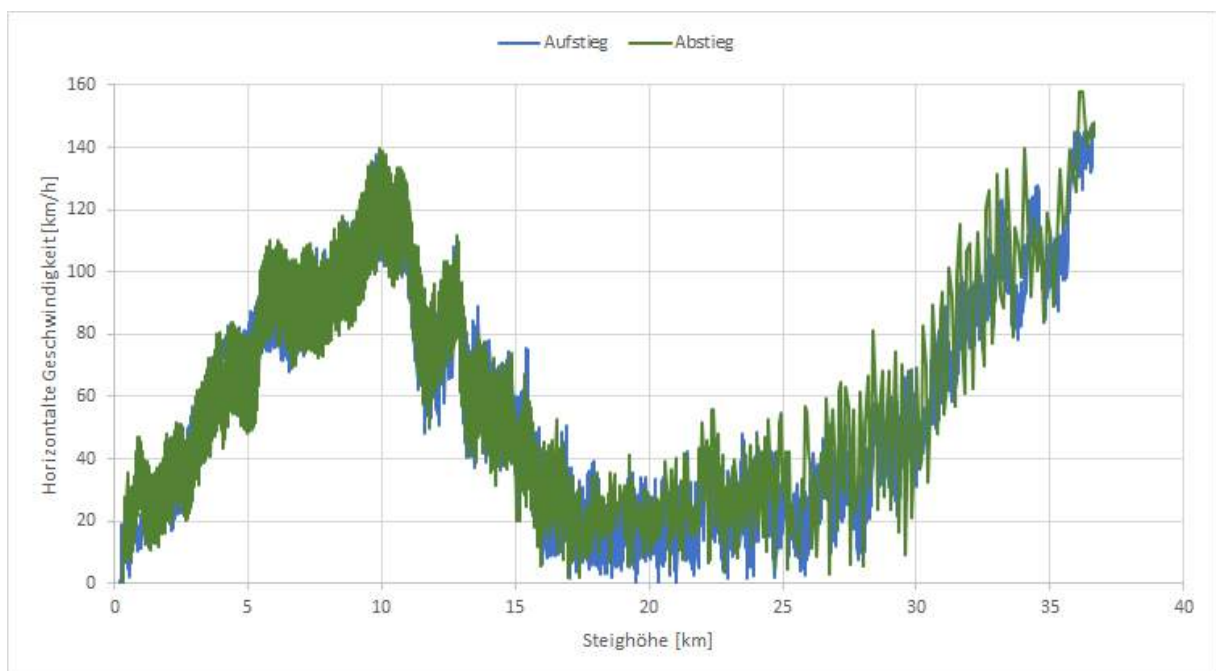


Abb. 16: Verlauf der horizontalen Geschwindigkeit über die Flughöhe.

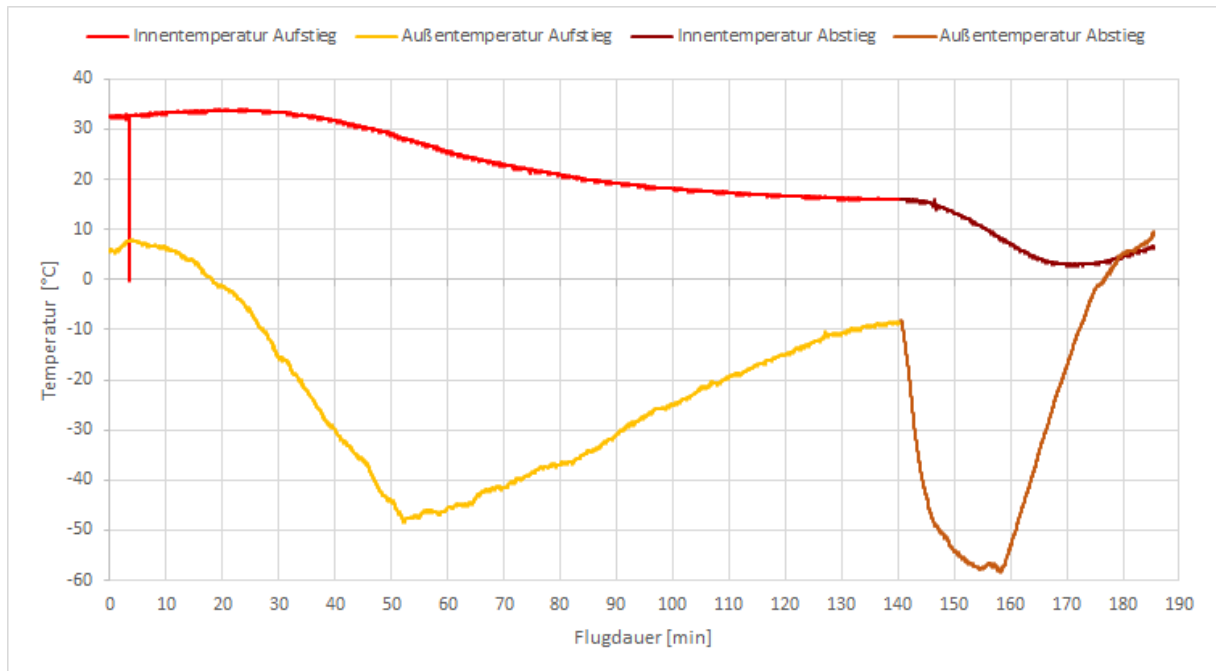


Abb. 17: Verlauf der Innen- (rot) und Außentemperatur (gelb/orange) über die Flugdauer.

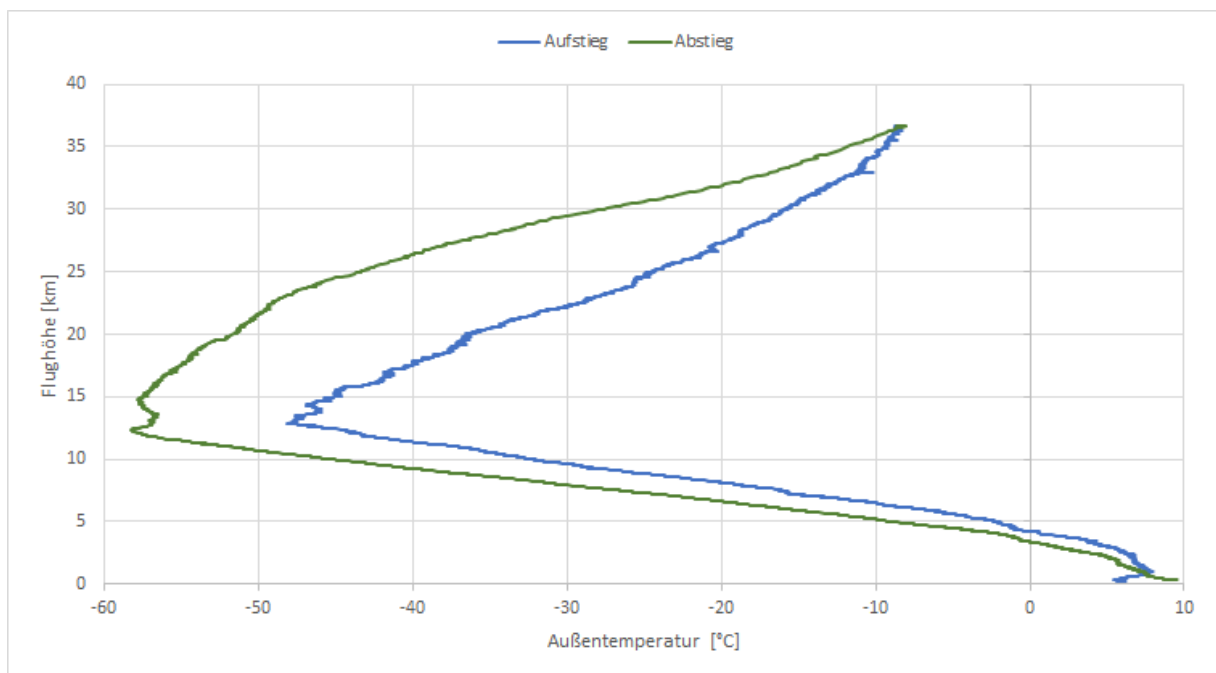


Abb. 18: Verlauf der Flughöhe über die Temperatur.

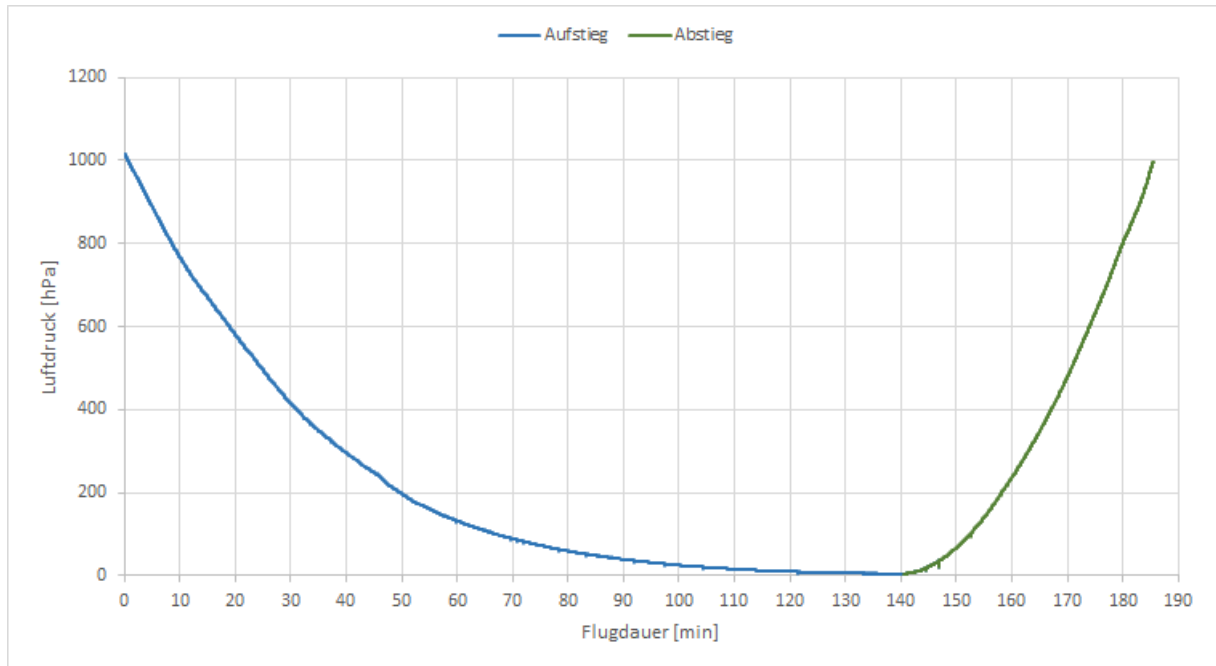


Abb. 19: Verlauf des Luftdrucks über die Flugdauer.

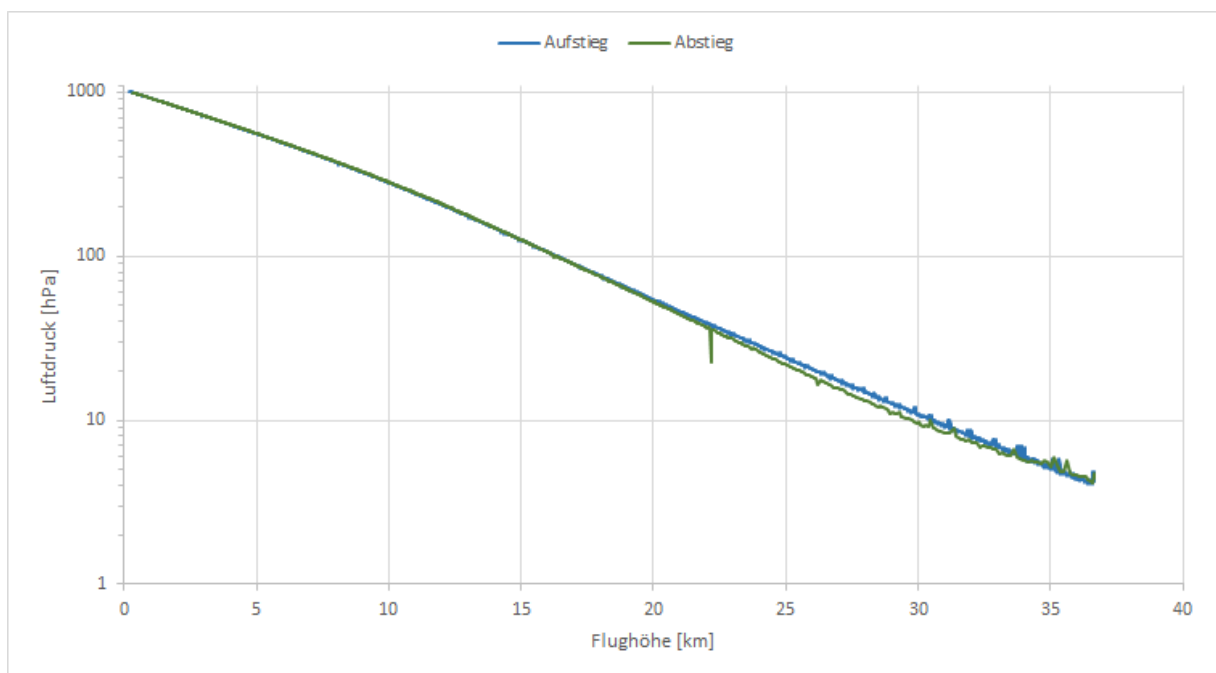


Abb. 20: Halblogarithmischer Verlauf des Luftdrucks über die Flughöhe.

8.3 Aufnahmen der Bordkamera



Abb. 21: Die neuen Chemiegebäude, vor welchen der zweite Start stattgefunden hat.



Abb. 22: Der restliche naturwissenschaftliche Campus der Justus-Liebig-Universität Gießen mit dem ersten Startplatz (roter Pfeil).



Abb. 23: *Gießen mit Lahn, Blick in nordöstliche Richtung.*



Abb. 24: *Wolkenbedeckung einen Kilometer südlich des Startplatzes. Wir hatten Glück mit dem wolkenlosen Himmel beim Start, bei so einer Bedeckung hätte der Ballon nicht starten dürfen.*



Abb. 25: Erdkrümmung und Rhein, Blickrichtung vermutlich Südwesten.



Abb. 26: Erdkrümmung und Mond (weißer Pfeil) in etwa 36,5 km Höhe.



Abb. 27: *Platzen des Ballons vor der Sonne in 36,64 km Höhe.*



Abb. 28: *Kurz nach dem Platzen hat die Sonde einen Überschlag gemacht, während sie in die Tiefe gestürzt ist.*



Abb. 29: Kurz vor der Landung nahe Siegen.



Abb. 30: Kurz nach der Landung in einer etwa 30 m hohen Fichte. Durch das lange Seil zwischen Fallschirm und Sonde hing letztere jedoch deutlich tiefer.



Abb. 31: Sonde kurz vor der Bergung.



Abb. 32: Sonde auf dem Weg zum Erdboden.