

Projektarbeit

Planung, Durchführung und Auswertung einer
Stratosphärenballonmission

vorgelegt von:

Lars Klingenstein, Matr. Nr.: 2058095

betreut von:

Apl. Prof. Dr. Jens Sören Lange

Wintersemester 20/21
Justus-Liebig-Universität Gießen

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Planung des Ballons	4
2.1	Aufbau der Erdatmosphäre	4
2.1.1	Troposphäre	4
2.1.2	Stratosphäre	5
2.1.3	Mesosphäre	5
2.2	Ozon in der Erdatmosphäre	6
2.3	Ziele	6
2.4	Benötigte Hardware	6
3	Bau der Sonde	8
4	Verlauf der Stratosphärenballonmission	10
4.1	Vor dem Start	10
4.2	Start	11
4.3	Bergung	11
5	Auswertung	12
5.1	Temperatur	12
5.2	Luftfeuchtigkeit	13
5.3	Luftdruck	14
5.4	Ozon	17
5.4.1	In der Erdatmosphäre	17
5.4.2	Im Labor	19
6	Fazit und Ausblick	22
7	Quellen	23

Kapitel 1

Einleitung

Stellt man sich den Weltraum vor, kommt man wahrscheinlich schnell auf den Gedanken, dass die Erforschung dieser unendlichen Weite alles andere als leicht ist. Und das stimmt. Auch wenn mittlerweile Menschen auf dem Mond waren, es eine durchgehend bemannte Raumstation im Erdorbit gibt und schon menschengemachte Geräte die Oberflächen anderer Planeten erforschen, ist die Raumfahrt insgesamt zeitaufwendig, verlangt viel Know-How und kostet vor allem Geld. Werden diese Schwierigkeiten überwunden und es ist eine Weltraummission finalisiert, ist das trotzdem keine Garantie, dass beim oder während des Startes, oder auf dem Weg zur Erfüllung des Missionszieles alles nach Plan funktioniert.

Eine wesentlich anfängerfreundlichere Methode um erste Schritte Richtung Weltraum zu machen, ist die Expedition mit einem Stratosphärenballon (SB) in die Erdatmosphäre. Sie ist kostengünstiger, in relativ kurzer Zeit realisierbar und kann auch von einer motivierten Gruppe Amateurräumfahrern realisiert werden. Eine Mission mit einem SB kann natürlich nicht mit typischen Satellitenmissionen verglichen werden. Ein durchschnittlicher Ballon erreicht eine maximale Steighöhe von ca. 30-40 Kilometern, professionelle Varianten kommen auf Höhen an die 50 Kilometer [1]. Damit erreichen sie die 100 Kilometer über dem Meeresspiegel liegende Kármán-Linie, die den Übergang zum Weltraum markiert [2], nicht, was bedeutet, dass mit einem SB auch nicht die gleichen Daten gesammelt werden, bzw. Experimente durchgeführt werden können, wie mit einem Satelliten, die die Erde in bis zu 36.000 Kilometern umrunden. Messbare Daten wie Luftdruck oder Ozongehalt sind sehr interessant und für u. a. die Meteorologie überaus wichtig, um z.B. Wetterprognosen abzugeben. Außerdem ist anzumerken, dass Daten der Stratosphäre eigentlich ausschließlich mit Wetter-, bzw. Stratosphärenballons gemessen werden können, da sie für Forschungsflugzeuge zu hoch und für Satelliten zu niedrig ist.

Im Zuge dieser Arbeit wird ein SB zur Messung von Temperatur, Luftdruck, Luftfeuchtigkeit und Ozongehalt der Atmosphäre entwickelt und gestartet. Im Folgenden werden zuerst die notwendigen Schritte zur Vorbereitung der Stratosphärenballonmission (SBM) erläutert. Dabei wird anfangs der Aufbau der Erdatmosphäre erläutert. Anschließend werden die Ziele der SBM und wichtige Hardware für eine erfolgreiche Mission genannt. Im Anschluss wird der Aufbau des Ballons grob umrissen, auf andere wichtige Vorbereitungen wie zum Beispiel rechtliche Grundlagen soll in dieser Arbeit nicht genauer eingegangen werden. Danach wird der Ablauf der SBM beschrieben. Im Folgenden werden die gesammelten Daten der SBM mit Schwerpunkt auf der Ozonmessung ausgewertet. Zum Schluss wird auf weitere Ozonmessungen eingegangen und der Erfolg der SBM bewertet.

Kapitel 2

Planung des Ballons

Der erste Schritt bei der Planung einer SBM besteht darin, die Missionsziele zu definieren. Da jede Mission anders ist, müssen vor Beginn einer jeder Mission die zu messenden Daten und die dafür notwendige Hardware ausgewählt werden.

Hierzu ist es notwendig, dass im Vorhinein eine grobe Kenntnis vom Aufbau der Erdatmosphäre besteht, um zu wissen, worauf bei der Hardwarewahl zu achten ist und welche Ziele einer SBM überhaupt realistisch erreichbar sind.

2.1 Aufbau der Erdatmosphäre

Als Atmosphäre wird eine gasförmige Hülle um einen Planeten bezeichnet, die durch dessen Gravitationskraft an ihn gebunden ist. Im Falle der Erde nennt man die Atmosphäre auch Erdatmosphäre. Die trockene Erdatmosphäre besteht in den unteren 100 Kilometern aus:

Bestandteil	Anteil in Volumen-%
Stickstoff	78,080
Sauerstoff	20,950
Argon	0,930
Kohlenstoffdioxid	0,034
Rest	0,006

Tabelle 2.1: Bestandteile der Erdatmosphäre [10]

Der genannte Rest setzt sich aus Spurengasen wie Helium, Neon, Wasserstoff und Ozon (Anteil: $7 \cdot 10^{-6}$ Vol-%) [10] zusammen. Die Atmosphäre wird anhand ihrer Temperatur in fünf Schichten aufgeteilt. Da ein SB auf einer Höhe von ca. 36 Kilometern seine Platzhöhe erreicht, kann bei einer SBM nur bis in die zweite Schicht vorgedrungen werden. Deswegen werden im Folgenden nur die unteren, für eine SBM relevanten Schichten näher vorgestellt. In Abb. 2.1 sind alle Schichten der Atmosphäre schematisch dargestellt.

2.1.1 Troposphäre

Die Troposphäre ist die unterste Schicht der Erdatmosphäre und erstreckt sich vom Erdboden bis in eine Höhe von ca. 8 Kilometern an den Polen und 17 Kilometern am Äquator. In dieser Schicht befindet sich der Großteil der Masse der Atmosphäre, also die meiste Luft und der meiste Wasserdampf. Infolge der Erwärmung des Erdbodens durch

die Sonne erwärmt sich auch die darüberliegende Luft und steigt auf. Beim Aufsteigen kühlt die Luft ab und durchmischt sich mit anderen Luftmassen. Es stellt sich so ein Temperaturgefälle von ca. 6,5 Grad Celsius pro Kilometer Höhe ein, sodass die Tropopause, die Grenzschicht zur nächsthöheren Atmosphärenschicht, eine Temperatur von -50 Grad Celsius an den Polen und bis zu -80 Grad Celsius am Äquator erreicht. Durch den hohen Wasserdampfgehalt und die ständigen Luftzirkulationen läuft in ihr der Großteil des Wettergeschehens ab und es bilden sich z.B. Wolken und Winde [11, 12].

2.1.2 Stratosphäre

Die Stratosphäre grenzt an die Tropopause und reicht in eine Höhe von ca. 50 Kilometern. In ihr steigt die Temperatur mit zunehmender Höhe, jedoch langsamer, als sie vorher in der Troposphäre gesunken ist. Dies liegt daran, dass das dort vorhandene Ozon die ultraviolette (UV-) Strahlung der Sonne absorbiert und in Wärme umwandelt. Dadurch werden gleichzeitig die Troposphäre und die Erdoberfläche vor einem Großteil der schädlichen UV-Strahlung geschützt. So erreicht die obere Grenze der Stratosphäre, die Stratopause, eine Temperatur von knapp unter null Grad Celsius. Wetterphänomene lassen sich in der Stratosphäre kaum beobachten. Die Luft ist hier sehr viel trockener, weil der Wasserdampf fast vollständig in der Troposphäre zu Wolken kondensiert ist und es aufgrund der unterschiedlichen Temperaturgradienten nur einen sehr geringen Stoffaustausch zwischen Tropo- und Stratosphäre gibt. Somit ist die Stratosphäre auch viel ruhiger und weniger turbulent als die Troposphäre [12, 13].

2.1.3 Mesosphäre

Die Mesosphäre kann in der SBM aufgrund ihrer Höhe von ca. 50 bis 80 Kilometern nicht mehr erreicht werden. In ihr kommt es zu einer Abkühlung, die dadurch bedingt ist, dass es hier fast kein Ozon mehr gibt, das die UV-Strahlung der Sonne absorbieren kann und der Luftdruck extrem abgesunken ist. So erreicht das obere Ende der Mesosphäre, die Mesopause, eine Temperatur von bis zu -90 Grad Celsius [12, 14].

Es bleibt festzuhalten, dass die Erdatmosphäre eine hochkomplexe Umgebung ist und die unteren Schichten, die Tropo- und Stratosphäre, mit einer SBM erreichbar sind und sehr interessante und aussagekräftige Messungen erlauben

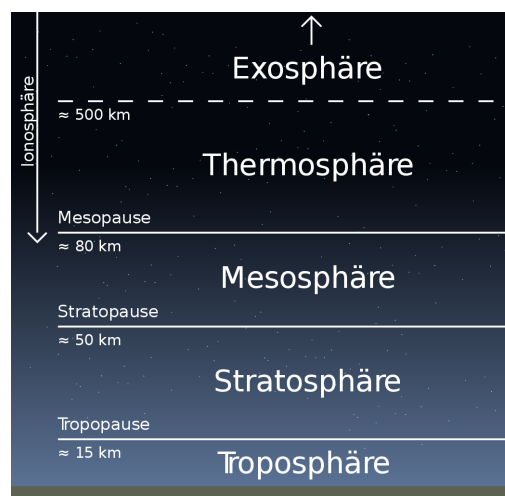


Abbildung 2.1: Einzelne Schichten der Erdatmosphäre [19]

2.2 Ozon in der Erdatmosphäre

Wie schon erwähnt, besteht die Erdatmosphäre aus nur $7 \cdot 10^{-6}$ Vol-% Ozon. Trotzdem ist es ein wichtiger Bestandteil dieser, da es die Temperatur in der Stratosphäre und den Anteil gefährlicher UV-Strahlung auf der Erde sehr stark beeinflusst. Das Ozon ist vor allem in der sogenannten Ozonschicht in der unteren Stratosphäre konzentriert. Da der Anteil des Ozons sehr gering ist, ist für die Messung ein sehr empfindlicher Sensor erforderlich. Auf das Ozon in der Erdatmosphäre wird in Kap. 5.4 genauer eingegangen.

2.3 Ziele

Ziel der SBM ist es, grundlegende Parameter der Erdatmosphäre wie Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchtigkeit zu messen. Außerdem wird der Ozongehalt gemessen, um die Lage der Ozonschicht zu bestimmen und den generellen Ozongehaltverlauf aufzuzeichnen. Zusätzlich wird ein Experiment zum Nachweis hochenergetische Teilchen in der kosmischen Strahlung durchgeführt. Die gemessenen Daten werden danach auf Korrelation überprüft. Deswegen war es das Ziel, mit der SBM so hoch wie möglich zu steigen und möglichst weit in die Stratosphäre einzudringen, damit dort Messungen zur Bestimmung der Lage der Ozonschicht und zum Nachweis der Höhenstrahlung durchgeführt werden können.

2.4 Benötigte Hardware

Die einzelnen Atmosphärenparameter lassen sich am besten mit Hilfe elektronischer Sensorik messen. Hier besteht eine Vielzahl von Möglichkeiten, da es viele verschiedene Sensoren für unterschiedliche Anforderungen frei zu kaufen gibt. Als Schnittstelle für die Sensoren wird ein Arduino verwendet. Die Stromversorgung funktioniert hier über eine 9V Batterie. Als Sensor für Luftdruck, Luftfeuchtigkeit und Temperatur wird der GY-BME280 von AZ-Delivery [4] verwendet, da dieser drei Parameter gleichzeitig messen kann, Arduino-kompatibel ist und damit den Anforderungen entspricht. Am wichtigsten war es, dass der Sensor sehr niedrige Temperaturen aushalten und diese messen kann, da der untere Bereich der Atmosphäre kälter als -50 Grad Celsius sein kann. Um das Ozon zu messen, wurde der Gravity: I2C Ozone Sensor von DFRobot [5] ausgewählt. Hier ist eine Temperaturuntergrenze von nur -20 Grad Celsius angegeben, da kein anderer Sensor mit einer niedrigeren Untergrenze gefunden wurde, wurde dieser trotzdem verwendet.

Um die gemessenen Daten zu speichern wird eines sog. Shield benötigt. Das Shield wird auf den Arduino gesteckt und besitzt eine SD-Karten Schnittstelle und eine eingebaute Uhr. Mit einem geeigneten Programm ist es dann möglich, die Sensorwerte in einem bestimmten Zeitintervall abzufragen und mit Zeitstempel auf der SD-Karte zu speichern. Das Programm wurde selbst geschrieben und so konzipiert, dass es alle fünf Sekunden alle Messwerte in eine comma separated values (.csv) Datei auf der SD-Karte speichert. Diese muss nach Rückkehr des SB nur noch ausgewertet werden.

Auch den eigentlichen Ballon samt Zubehör wie Fallschirm und GPS-Tracker kann online gekauft werden. Auf der Website <https://www.stratoflights.com/> gibt es ein großes Angebot an Wetterballons und Zubehör. Bei den Ballons gilt: je mehr Fassungsvermögen (Volumen), desto größer die Steighöhe und desto schwerer darf das Payload sein. Als Payload wird hier die gesamte Nutzlast des Ballons bezeichnet, also Sensorik und Elektronik samt Behälter. Da eine möglichst hohe Steighöhe erreicht werden sollte, wurde der Wetterballon 1600 ausgewählt, der ein Payload von bis zu 1,6 kg befördern und eine

Steighöhe von bis zu 38 Kilometern erreichen kann. Da noch andere wichtige Komponenten gebraucht wurden, wurde ein Komplettpaket [6] gekauft, in dem der Ballon, ein Fallschirm, ein GPS-Tracker, eine Kamera, ein Datenlogger und weiteres Zubehör enthalten ist.

Der Datenlogger misst neben Luftfeuchtigkeit, Luftdruck und Temperatur auch noch die Höhe und die Position des Ballons, sowie die Temperatur im Inneren der Sonde. Dies ermöglicht es, die gemessenen Daten in Abhängigkeit der Flughöhe darzustellen. Da die Höhe mit einem Accelerometer bestimmt wird, wird gleichzeitig auch die Geschwindigkeit des Ballons aufgezeichnet. Die somit doppelt erhobenen Daten können gut miteinander verglichen werden und es gibt ein Backup, falls eines der Messgeräte, Datenlogger oder Arduino, während des Fluges ausfallen sollte. Auch die Daten des Datenloggers werden auf einer SD-Karte in einer .csv-Datei gespeichert. Er misst dabei in einem Intervall von zwei Sekunden. Diese Daten können dann auf unterschiedliche Weisen ausgewertet werden. Es ist auch möglich, die Datei auf <https://www.stratoflights.com/> hochzuladen und mit einem Tool [9] selbständig auswerten zu lassen.

Der GPS-Tracker basiert auf Mobilfunk und funktioniert, in dem man eine SIM-Karte einlegt und anruft. Hat der Tracker Empfang, wird die genaue Position mit einer SMS an den Anrufer zurückgesendet. Die Kamera hat keinen wissenschaftlichen Nutzen, dokumentiert jedoch den gesamten Flug und liefert spannendes Filmmaterial. Die Landung ist hier besonders interessant, da untersucht werden kann, wie schnell und wo die Sonde landet.

Zur Untersuchung der Höhenstrahlung werden beschichtete Glasplatten benutzt, die ähnlich wie Fotofilm funktionieren. Trifft ein hochenergetisches Teilchen auf die Platte, hinterlässt es eine Spur und kann so nachgewiesen werden. Die genaue Vorgehensweise und theoretischen Hintergründe können in einer Arbeit von William Roster nachgelesen werden. Die Auswertung der Platten ist noch nicht abgeschlossen.

Kapitel 3

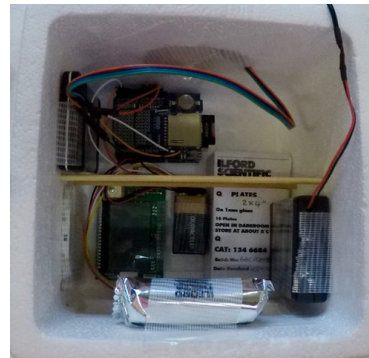
Bau der Sonde

Auch für den Bau der Sonde wurde sich an der Website <https://www.stratoflights.com/> orientiert. Hier gibt es ausführliche Anleitungen und Videos, wie bei dem Zusammenbau des Wetterballons bzw. des Payloads am besten vorzugehen ist. An diese Anleitung wurde sich größtenteils gehalten, weswegen der Aufbau hier nur grob beschrieben wird.

Als erstes wird die Sonde, also die Styroporbox mit allen Elektronikkomponenten, vorbereitet. Dazu wird in den Boden der Box ein kleines Loch gebohrt, durch das der Sensor des Datenloggers und der BME280 passt. Die Kabel führen durch das Loch ins Innere der Box, wo der Arduino und der Datenlogger an der Sondeninnenseite fixiert sind. Für die Kamera wird ein zweites Loch in die Seite der Sonde geschnitten, das gerade groß genug ist, dass das Objektiv der Kamera hineinpasst. Es ist wichtig, dass die Löcher nur so groß sind wie sie sein müssen und gründlich abgedichtet werden, damit die Sonde gut isoliert ist. Nur so kann eine Temperatur gewährleistet werden, bei der die elektronischen Komponenten zufriedenstellend funktionieren. Auch aus diesem Grund ist die Sonde aus Styropor, das als gutes Dämmmaterial fungiert und leicht ist. Zusätzlich werden vor dem Start zwei Taschenwärmer in die Sonde gelegt, die mit Sauerstoff reagieren und so Wärme erzeugen. Ein drittes Loch wird für den Ozonsensor in eine andere Wand gebohrt. Da der Ozonsensor etwas empfindlicher gegenüber kälteren Temperaturen ist, wird er nicht wie die anderen beiden Sensoren komplett außerhalb der Sonde angebracht, sondern nur die eigentliche Messfläche der Umgebung ausgesetzt, sodass der Rest des Sensors in der wärmeren Box bleibt. Stromversorgungen für Kamera, Arduino und Datenlogger werden dann an der Innenseite fixiert. So auch der GPS-Tracker und die Fotoplatten.



(a)



(b)

Abbildung 3.1: a: Bau der Sonde, gut zu sehen die Löcher für Sensoren und Kamera
b: Beladene Sonde kurz vor Start

Um eine Rotation um die eigene Achse zu verhindern, werden mit zwei Holzspießen, die quer durch die Sonde gestoßen werden, zwei Styroporflügel an gegenüberliegenden Seiten der Sonde befestigt. Diese sind vertikal ausgerichtet, sodass sie beim Auf- und Abstieg nicht stören. An den Deckel der Sonde wird eine spezielle Schnur befestigt, die aus rechtlichen Gründen eine Reißlast von unter 230 N besitzen muss. Nach ca. zehn Metern Schnurlänge wird der Fallschirm an die Schnur geknotet, dann folgten weitere ca. fünf Meter bis zum Ballon. Das Gespann ist deswegen so lang, damit falls sich der Ballon bei der Landung in einem Baum verfängt, die Sonde 15 Meter tiefer hängt und leichter zu bergen ist. Der Deckel der Sonde wird erst kurz vor Start, nachdem die Elektronik angeschaltet wurde, auf die Box gelegt und sorgfältig festgeklebt. Als letztes wird der aufgeblasene Ballon mit dem oberen losen Ende der Schnur verknötet.

Kapitel 4

Verlauf der Stratosphärenballonmission

Im Folgenden wird kurz der Verlauf der SBM beschrieben und auf ihre einzelnen Phasen eingegangen.

4.1 Vor dem Start

Die Füllung des Ballons erfolgte mit Helium. Es ist wichtig, dass die richtige Menge an Helium verwendet wird, damit zum einen die Auftriebskraft des Ballons reicht, damit das Gespann vom Boden abhebt und eine ausreichende Aufstiegs geschwindigkeit besitzt, zum anderen jedoch die Menge an Helium nicht zu groß ist, da er dann bei einer geringeren Höhe platzen würde. Der Ballon dehnt sich mit steigender Höhe immer weiter aus, da der Luftdruck der Atmosphäre mit größerer Höhe immer niedriger wird. Ist in dem Ballon mehr Helium, ist sein Volumen größer und der Ballon muss sich weniger ausdehnen, also auch weniger hochsteigen, bevor er platzt. Die optimale Menge Helium kann mit einem Heliumrechner [7] bestimmt werden, der auch auf der Website <https://www.stratoflights.com/> verfügbar ist. Nach Eingabe der erforderlichen Parameter wird als Gesamtvolumen des Gases, sowie eine Angabe, wie viel Bar dieses Volumen in einer Druckgasflasche entspricht ausgegeben. Kritisch ist hier vor allem die Masse des Payloads. Addiert man die Masse des Payloads und Masse des Ballons erhält man die sogenannte Traglast. Die Auftriebskraft des Ballons muss nun größer sein als die Gewichtskraft der Traglast, damit ein Start möglich ist. Diese Bedingung ist schon bei ca. 2.300 Litern Helium erreicht. Nun resultiert die optimale Füllmenge aus einer Abwägung zwischen Steiggeschwindigkeit und maximal zu erreichender Steighöhe. In diesem Fall wurde als Ziel gesetzt, eine Höhe von 37 Kilometern zu erreichen. Das Payload wiegt ungefähr 1160 Gramm. Somit mussten der Ballon laut Heliumrechner mit 3.652 Litern Helium befüllt werden, dieser hat dann eine Steiggeschwindigkeit von $4,69 \frac{m}{s}$. Wird davon ausgegangen, dass diese Geschwindigkeit konstant ist, kann die Zeit zum Platzen berechnet werden. Diese ist sinnvoll zu wissen, um eine grobe Zeit abschätzen zu können, wann der Ballon wieder auf der Erde landet und geborgen werden kann. Zu beachten ist, dass diese ermittelten Werte nicht exakt sind, da die Erdatmosphäre ein sehr komplexes System ist. Es wird also nur ein Richtwert vorgegeben.

Um eine einfache Bergung vorzubereiten ist es gut zu wissen, wo ungefähr der Ballon landen wird. Der mitgeführte GPS-Empfänger basiert auf Mobilfunk und ist deswegen in großen Höhen nicht erreichbar. Erst, wenn der Ballon wieder näher über dem Boden oder gelandet ist, kann die Position des Ballons abgefragt werden. Eine Abschätzung der ungefähren Lande position wird mit einem Tool [8] auf der Website

<https://www.stratoflights.com/> ermittelt. Hier werden alle benötigten Parameter eingegeben, woraufhin eine Karte angezeigt wird, auf der die ungefähre Landeposition abgelesen wird. Dafür werden aktuelle Wetterdaten genutzt. Wird kurz vor Start eine Vorhersage berechnet, ist die vorhergesagte Position meistens sehr nah an der echten.

4.2 Start

Der Start des Ballons erfolgte am 7. November 2020 um ca. 9 Uhr auf dem Gelände des Campus Naturwissenschaften der Justus-Liebig-Universität in Gießen. Nachdem alle Startvorbereitungen getroffen waren, wurde der Ballon langsam und vorsichtig an der Schnur hochgelassen. Der eigentliche Start erfolgte, als die Sonde am Ende der Schnur losgelassen wurde. Leider war der Auftrieb des Ballons anfangs nicht groß genug, damit er schnell an Höhe gewinnen, und so die umliegenden Gebäude passieren konnte, wodurch die Sonde mehrere Male gegen verschiedene Gebäude auf dem Campus gestoßen ist. Obwohl sehr genau auf die Menge des abgefüllten Heliums geachtet und diese vor dem Start mit dem Heliumrechner bestimmt wurde, schien diese nicht auszureichen, um genug Auftrieb zu gewährleisten. Dies lag wahrscheinlich daran, dass beim Befüllen des Ballons nicht die gesamte Menge des aus dem Schlauch strömenden Heliums in den Ballon gelangte. Ein weiterer Grund könnte sein, dass der verwendete Druckminderer an der Druckflasche undicht gewesen ist. Die Sonde konnte wieder eingefangen, der Ballon an der Schnur heruntergezogen und der Ballon mit noch etwas mehr Helium befüllt werden. Ein zweiter Start um ca. 10 Uhr klappte reibungslos.

4.3 Bergung

Im Vorhinein wurde ein Landeplatz in der Nähe von Siegen prognostiziert. Auf der Fahrt dorthin wurde der GPS-Tracker kontaktiert, der daraufhin seine Position geschickt hat. Er befand sich wirklich in der Nähe von Siegen in einer kleinen Gemeinde. Leider ist das Gespann über einem Waldstück niedergegangen und der geplatzte Ballon hatte sich in einem Baum verfangen. Trotz der 15 Meter langen Schnur zwischen Sonde und Ballon hing die Sonde noch in einigen Metern Höhe und konnte nicht heruntergeholt werden. Die freiwillige Feuerwehr der Gemeinde war hilfsbereit und hat die Sonde aus dem Baum geborgen.

Kapitel 5

Auswertung

Aus Aufzeichnungen der SD-Karte des Arduinos geht hervor, dass beim ersten Start des Ballons ein Kabel zur Stromversorgung aus einer Halterung gerissen wurde, wodurch beim Flug keine Messungen mit dem Arduino möglich waren. Zur Auswertung stehen deswegen nur die Daten des Datenloggers, also Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftdruck. Die Ozondaten konnten nicht aufgenommen werden. Deswegen kann hier keine Auswertung stattfinden, weswegen nur bekannte Ozondaten erläutert werden.

Die Platzhöhe des Ballons betrug 36.640,4 Meter. Damit wurde die als Ziel gesetzte Steighöhe von 37 Kilometern knapp nicht erreicht. Diese Höhe reicht für die Auswertung der Daten trotzdem aus.

Im Folgenden werden die gemessenen Daten von Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftdruck bis zur unteren Stratosphäre ausgewertet und mit dem in Kap. 2.1 beschriebenen Modell verglichen.

5.1 Temperatur

Die gemessenen Temperaturdaten können verwendet werden, um den in 2.1 beschriebenen Aufbau der Atmosphäre zu überprüfen. Hier wird nur die Temperatur beim Aufstieg ausgewertet, der Temperaturerlauf beim Abstieg ist sehr ähnlich, jedoch immer um ca. 10-20°C nach unten verschoben. Man könnte denken, dass die niedrigere Temperatur beim Herunterfallen durch die höhere Geschwindigkeit, also höhere Windgeschwindigkeiten, verursacht wird. Dieser Effekt wird Wind-Chill genannt. Dies ist hier jedoch nicht der Fall, da Wind-Chill nur bei Objekten auftritt, die durchgehend erwärmt werden und wärmer als ihre Umgebung oder feucht sind. So zum Beispiel bei der menschlichen Haut, wo der Wind-Chill spürbar ist. Elektrische Sensoren sind von diesem Effekt nicht betroffen, da sie nicht wirklich erwärmt werden (nur geringe elektrische Spannungen) und in der Regel die gleiche Temperatur wie die Umgebung haben. Feucht ist der Sensor wahrscheinlich auch nicht gewesen, da wie bei der Auswertung der Luftfeuchtigkeit später zu sehen ist, die Luft in einer Höhe ab 10 Kilometern so gut wie trocken ist. Die Differenz der Temperaturwerte existiert jedoch auch in einer größeren Höhe als 10 Kilometern. Die niedrigere Temperatur kommt deswegen wahrscheinlich daher, dass der Ballon beim Abstieg einen anderen Weg durch die Atmosphäre geflogen ist als beim Aufstieg und dort andere Gegebenheiten herrschten.

In Abb. 5.1 ist gut sichtbar, dass die Temperatur bis zu einer Höhe von 12.900 Metern sehr gleichmäßig sinkt. Dabei beträgt das Temperaturgefälle ca. -5,5 °C pro Kilometer Höhe (beim Abstieg ca. -7,3 °C pro Kilometer). Die Temperatur in 12.900 Metern Höhe

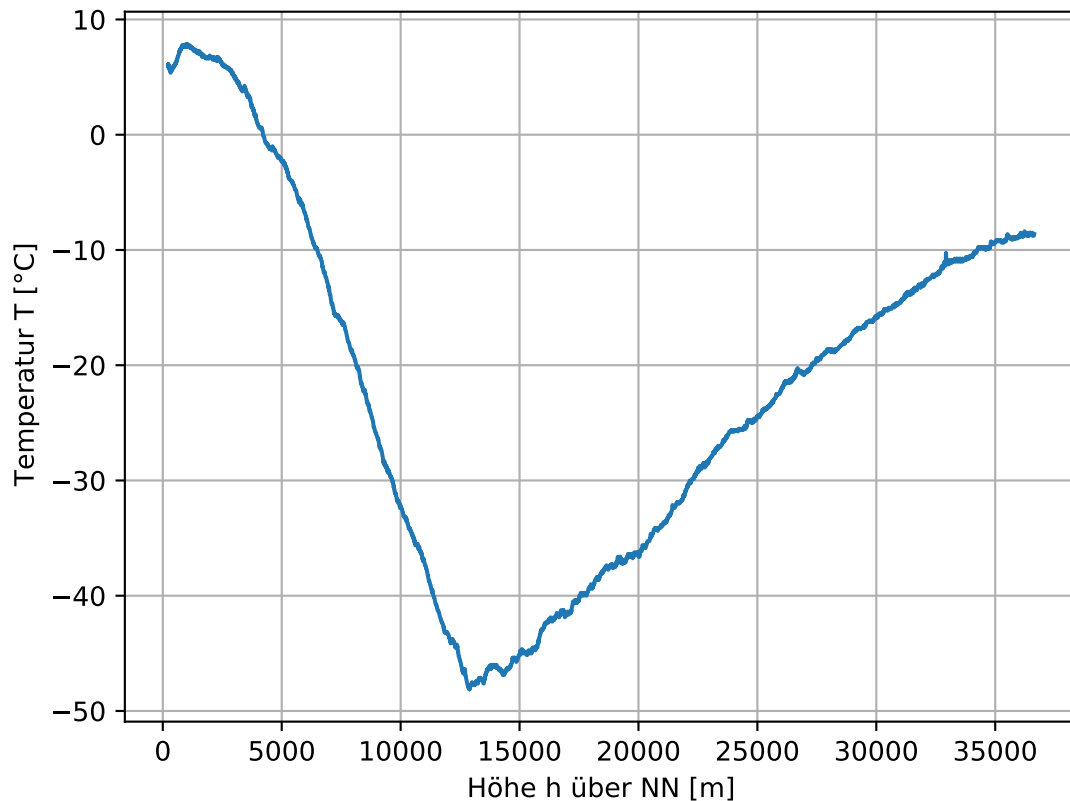


Abbildung 5.1: Gemessener Temperaturverlauf beim Aufstieg

beträgt ca. $-48\text{ }^{\circ}\text{C}$. Diese Werte passen sehr gut zu den Charakteristika der Troposphäre (s. Kap. 2.1.1), lediglich die Temperatur ist etwas zu hoch. Dies kann viele Gründe haben, z.B. tages- und tageszeitabhängige Phänomene wie Sonnenstand und Wolkendichte. Beim Abstieg wurde auf gleicher Höhe eine Temperatur von ca. $-57\text{ }^{\circ}\text{C}$ verzeichnet, was noch besser in das beschriebene Modell der Atmosphäre passt.

Auch ist gut erkennbar, dass die Temperatur nach 12.900 Metern, also in der Stratosphäre, wieder langsam auf einen Wert von ca. $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ in einer Höhe von 36.640,4 Metern ansteigt. Auch dies passt sehr gut zu dem Modell der Stratosphäre (s. Kap.2.1.2). Wäre der Ballon noch höher gestiegen, hätte man wahrscheinlich noch einen weiteren Temperaturanstieg auf bis zu annähernd $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ beobachten können.

5.2 Luftfeuchtigkeit

Auch für den Plot der Luftfeuchtigkeit über die Höhe wird nur der Aufstieg betrachtet. Hier werden nur die ersten 10 Kilometer Höhe geplottet, da danach ein konstanter Wert von 0,4% gemessen wurde. Die Untergrenze des Luftfeuchtigkeitssensors ist als 0,0% angegeben. Ich gehe davon aus, dass wegen Effekten wie z.B. Eis auf dem Sensor zu dieser Zeit ein leicht abweichender Wert gemessen wird, der reale Wert aber bei unter 0,4% liegt.

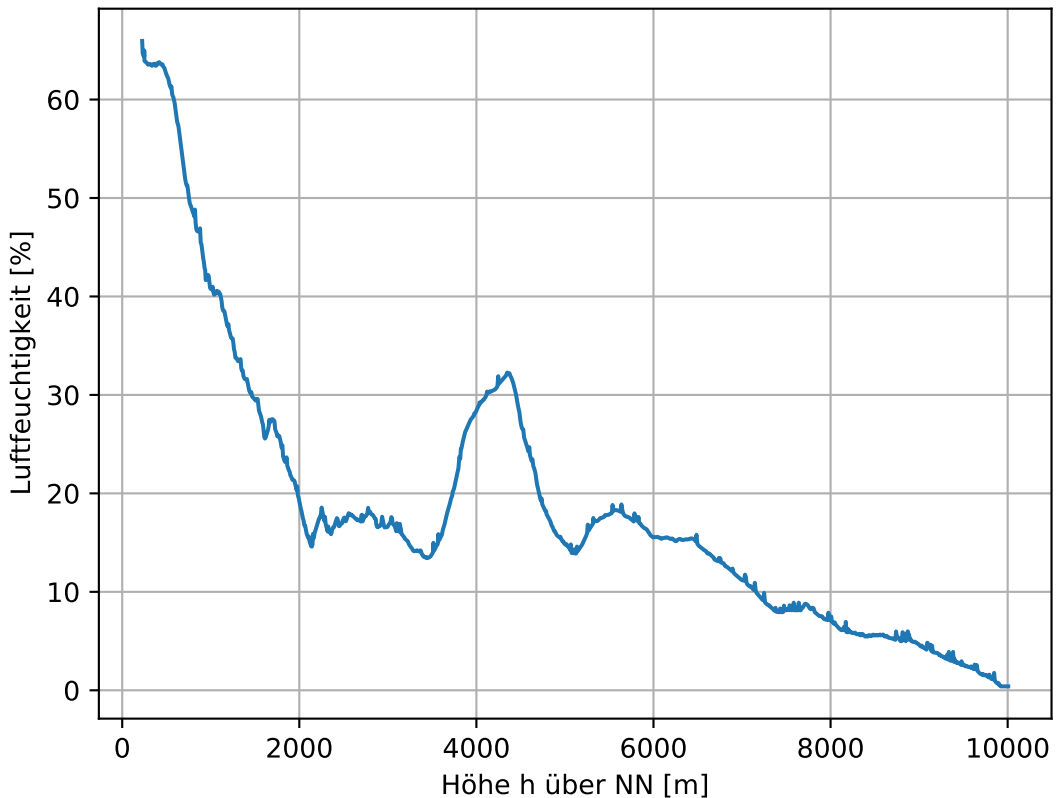


Abbildung 5.2: Gemessene Luftfeuchtigkeit beim Aufstieg

Abb. 5.2 zeigt sehr gut den generellen Trend, dass die Luftfeuchtigkeit mit der Höhe abnimmt. Dies und der Fakt, dass ungefähr ab der Stratosphäre die Luftfeuchtigkeit gleich 0% ist, stimmen ebenfalls sehr gut mit dem Modell der Atmosphäre überein. Der Peak um die Höhe von ca. 4.400 Metern kommt wahrscheinlich dadurch zustande, dass dort die Wolkendecke durchflogen wurde und deswegen die Luftfeuchtigkeit für einen bestimmten Höhenbereich wieder merklich angestiegen ist. Auf dem Abstieg gibt es einen ähnlichen Peak, der jedoch zwischen 5.500 und 8.000 Metern liegt. Dieser ist auch mit der Durchquerung der Wolkendecke zu begründen, da Wolken auf unterschiedlichen Höhen vorkommen.

5.3 Luftdruck

Sehr interessant ist die Auswertung der Daten für den Luftdruck, da es hier mit der barometrischen Höhenformel ein relativ einfaches mathematisches Modell gibt, mit dem der Luftdruck in Abhängigkeit von der Höhe berechnet wird. Wird der sehr vereinfachte Fall angenommen, dass die Atmosphäre isotherm ist, lautet diese:

$$p(h) = p_0 \cdot e^{-\frac{Mg}{RT}h}$$

mit dem Luftdruck auf Meereshöhe p_0 , der mittleren molaren Masse M der Atmosphäre, der Erdbeschleunigung g , der Gaskonstanten R und der mittleren Temperatur der Atmosphäre T . Mit der Definition der Skalenhöhe $h_S = \frac{RT}{Mg}$ vereinfacht sich die Formel zu

$$p(h) = p_0 \cdot e^{-\frac{h}{h_S}}$$

Somit folgt aus dem Modell eine exponentielle Abnahme des Druckes bei größerer Höhe. Anzumerken ist hier, dass es sich um ein sehr vereinfachtes Modell handelt und man je nach eingesetzter mittlerer Temperatur der Atmosphäre einen anderen Verlauf erhält.

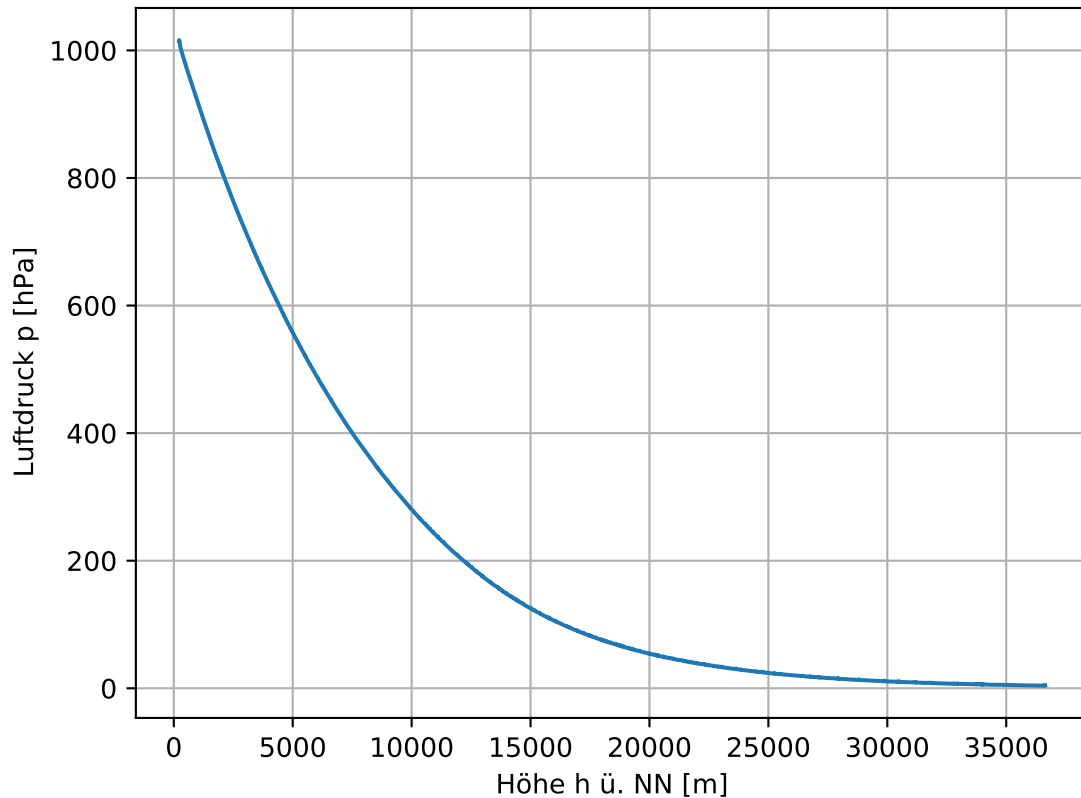


Abbildung 5.3: Gemessener Luftdruck beim Aufstieg

In Abb. 5.3 ist zu sehen, dass auch die gemessenen Daten einen exponentiell abfallenden Luftdruck repräsentieren. Mit einem selbstgeschriebenen Python-Programm habe ich nun diese Kurve gefittet, um die Parameter p_0 und h_S herauszufinden.

Abb. 5.4 zeigt den Verlauf des Luftdrucks mit dem von mir ermittelten Best-Fit. Die ermittelten Parameter des Fits sind:

$$p_0 = 1074,67 \text{ hPa}$$

$$h_S = 7283,32 \text{ m}$$

Normalerweise wird der Luftdruck auf Meereshöhe als $p_{0,theo} = 1 \text{ atm} = 1013,25 \text{ hPa}$ angegeben [15]. Es ist nicht zielführend, den Unterschied zwischen dem theoretischen und dem ermittelten Wert für p_0 mit physikalischen Phänomenen wie z.B. einem Hochdruckgebiet am Tag des Experiments zu erklären (diese erreichen auch gar nicht so hohe Drücke), da bei genauer Betrachtung zu erkennen ist, dass der Fit bei sehr geringen Höhen nicht mit den gemessenen Daten übereinstimmt, sondern höher ist. p_0 spiegelt

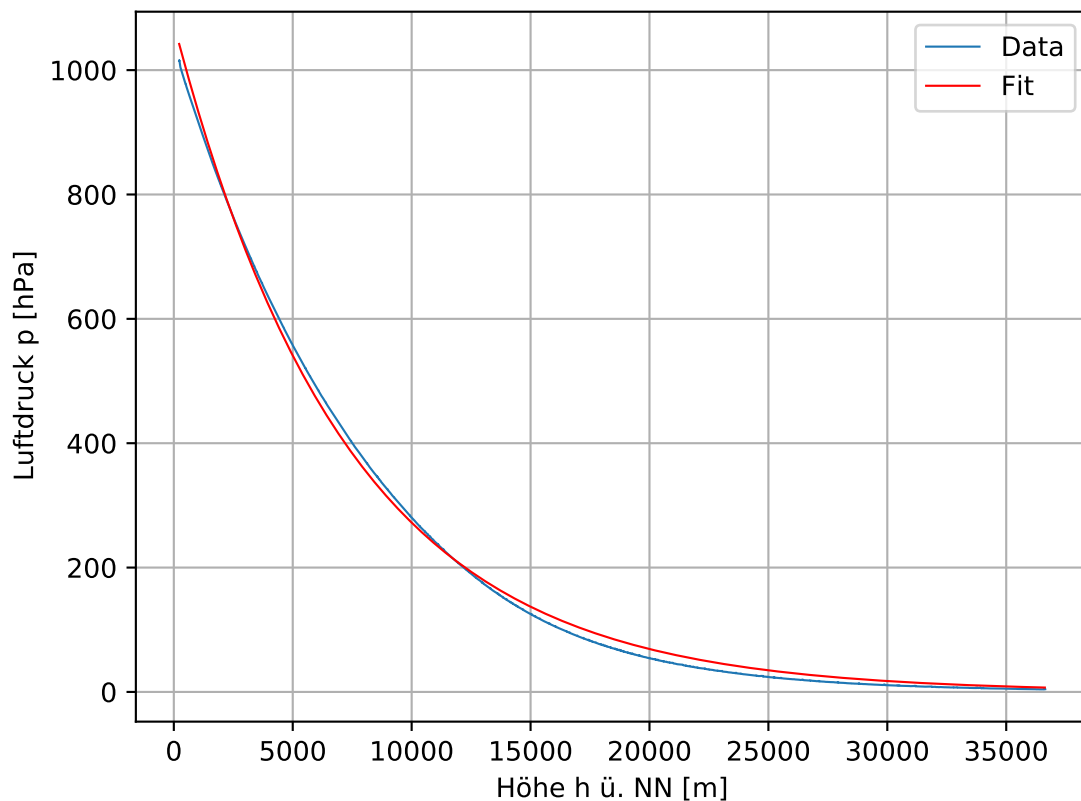


Abbildung 5.4: Gemessener Luftdruck beim Aufstieg mit Best-Fit

im Fit also nicht den tatsächlichen Luftdruck auf Meereshöhe wider, sondern ist nur ein durch den Fit bedingter Parameter. Es wäre auch möglich gewesen, p_0 im Fit auf den tatsächlich gemessenen Wert von ca. 1015 hPa zu fixieren, um in Abhängigkeit davon die Skalenhöhe herauszufinden.

Aus der Skalenhöhe kann die durchschnittliche Temperatur der unteren Atmosphäre berechnet werden:

$$h_S = \frac{RT}{Mg} \Rightarrow T = h_S \cdot \frac{Mg}{R} = 7283,32 \text{ m} \cdot \frac{0,028964 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{8,314 \frac{\text{J}}{\text{molK}}} = 248,91 \text{ K} = -24,24 \text{ }^\circ\text{C}$$

Wird der Mittelwert aller gemessenen Temperaturen beim Aufstieg berechnet, erhält man $\bar{T} = -22 \text{ }^\circ\text{C}$, was ein sehr ähnlicher Wert ist. Dies ist nur möglich, weil die Steiggeschwindigkeit des Ballons sehr konstant war. Die kleine Abweichung kommt daher zustande, dass der eingesetzte Wert für die Skalenhöhe über den Best-Fit bestimmt wurde und nicht exakt ist. Außerdem ist der gemessene Verlauf des Luftdrucks keine exakte e-Funktion, da ich sonst Werte für p_0 und h_S gefunden hätte, die den tatsächlichen Verlauf 100%ig widerspiegeln hätten.

Das Modell der barometrischen Höhenformel kann noch beliebig erweitert werden, indem z.B. Temperaturgradienten berücksichtigt werden. Dies soll hier jedoch nicht gemacht werden, da das Modell einer isothermen Atmosphäre augenscheinlich schon sehr

gute und relativ genaue Ergebnisse liefert, wenn der Druck auf Meereshöhe und die durchschnittliche Temperatur der Atmosphäre bekannt ist.

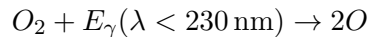
5.4 Ozon

In Kapitel 2.1 und 2.2 wurde die Rolle des Ozons in der Erdatmosphäre beschrieben. Im Folgenden wird genauer auf das Ozon in der Erdatmosphäre eingegangen und erläutert, welche Daten hätten gemessen werden können. Im Anschluss wird eine weitere Ozonmessung mittels Strahlungsquellen im Labor diskutiert.

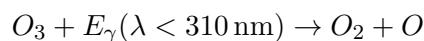
5.4.1 In der Erdatmosphäre

Ozon ist ein natürlich vorkommendes Spurengas. Es besteht aus drei Sauerstoffatomen und wird in Kurzform als O_3 geschrieben. Normalerweise kommt Sauerstoff, wie viele andere Gase auch, in Form von zwei gebunden Atomen vor. Deswegen muss Ozon erst gebildet werden. Dies passiert auf natürliche Weise, indem sich ein einzelnes Sauerstoffatom mit einem O_2 Molekül verbindet. Das einzelne Sauerstoffatom kann auf unterschiedliche Arten entstehen, wobei hier nur die in der Atmosphäre relevanten Prozesse genannt werden.

In der Stratosphäre, wo die Ozonkonzentration am höchsten ist, entsteht es u.a. durch Photolyse. Als Photolyse wird die Spaltung chemischer Bindungen durch elektromagnetische Strahlung, bzw. Licht bezeichnet. Hier muss die Energie des Photons ausreichen, um die vorliegende Bindung aufzubrechen. Im Falle von der Bindung von O_2 muss die Wellenlänge kürzer als ca. 230 nm sein (UV-C Strahlung). Dann wird ein O_2 Molekül in zwei einzelne Sauerstoffatome gespalten.



Ein viel größerer Anteil freier Sauerstoffatome entsteht jedoch durch die Photolyse von Ozon selbst. Bei einer Wellenlänge von unter 310 nm (UV-C und -B Strahlung) spaltet ein Photon ein Ozonmolekül:



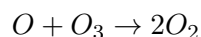
Dieser Prozess liefert deswegen viel mehr Sauerstoffatome, weil der Photonenfluss in diesem Wellenlängenbereich, bedingt durch das elektromagnetische Spektrum der Sonne, um mehrere Potenzen größer ist, als im Bereich unterhalb von 230 nm. Dies sind die Reaktionen, die dafür sorgen, dass die Erdoberfläche von einem Großteil der gefährlichen UV-Strahlung der Sonne abgeschirmt wird. Die Reaktionen sind Teil des sog. Ozon-Sauerstoff-Zyklus, auch Chapman-Zyklus genannt. Zu diesem Zyklus gehören noch zwei weitere Reaktionen zur Entstehung und zum Zerfall von Ozon [16]:

Entstehung:



M ist ein weiterer Stoßparameter, meistens O_2 oder N_2 , welcher überschüssige Energie der Reaktion abführt.

Zerfall:



Diese vier Reaktionen des Chapman-Zyklus sind im Gleichgewicht, wenn zu jedem Zeitpunkt gleich viel Ozon entsteht und zerfällt. Aus diesem Gleichgewicht resultiert jedoch nicht immer die gleiche Ozonkonzentration, da diese z.B. davon abhängt, wie viele Gasteilchen in einem Volumen zur Verfügung stehen und wie viele freie Sauerstoffatome produziert werden können. Es ist bekannt, dass in einer größeren Höhe der Luftdruck abnimmt. Somit sind dort weniger Sauerstoffmoleküle vorhanden, die durch Photolyse gespalten werden können und dann zu Ozon kombinieren würden. In der unteren Schicht der Stratosphäre ist der Luftdruck zwar viel höher, dort ist aber der limitierende Faktor, dass nicht mehr genug energiereiche Strahlung in diese Bereiche vordringt, da schon ein Großteil in höheren Schichten absorbiert wurde. Da die Absorption Wärme freisetzt und die oberen Schichten der Stratosphäre am meisten Strahlung ausgesetzt sind, ist es dort am wärmsten, mit sinkender Höhe sinkt die Temperatur (siehe auch Abb. 5.1), da weniger Strahlung in Wärme umgewandelt wird. Vereint man diese Kenntnisse mit den Reaktionen des Chapman-Zyklus, kann man eine Differentialgleichung, die die Ozonkonzentration beschreibt, lösen und ein Konzentrationsprofil für die Erdatmosphäre voraussagen [16].

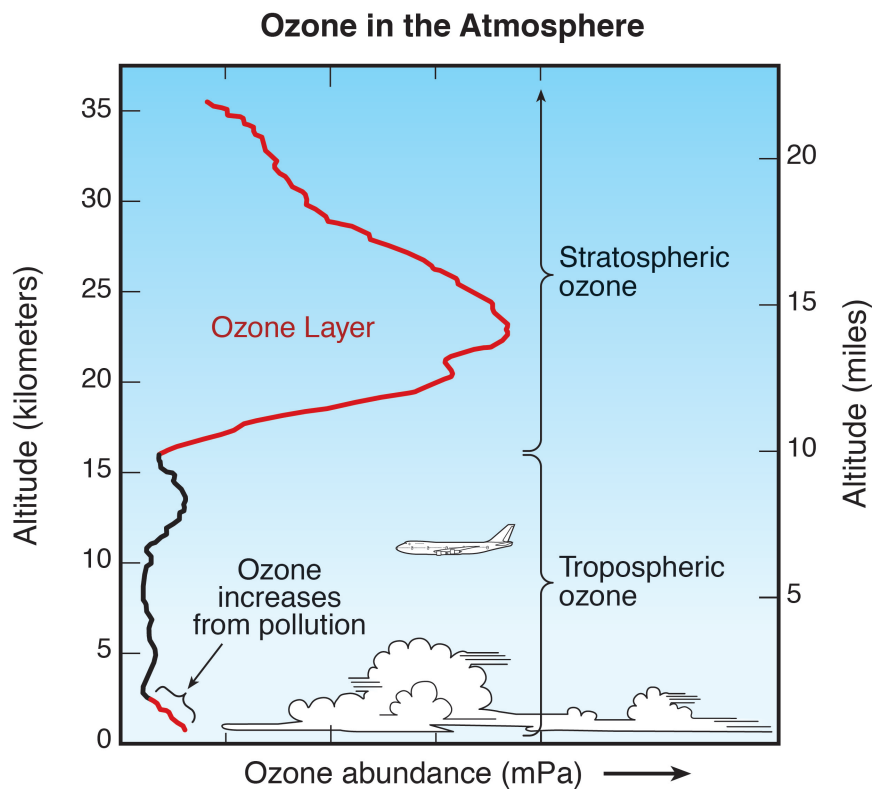


Abbildung 5.5: Verlauf des Ozongehalts in der unteren Atmosphäre [17]

Diese Voraussage wäre qualitativ sehr ähnlich, wie die in Abb. 5.5 dargestellte tatsächlich gemessene Häufigkeit. Hätte die Ozonmessung bei der SBM funktioniert, wären wahrscheinlich ähnliche Ergebnisse gemessen worden. In Abb. 5.5 wird der Ozonpartialdruck angegeben, der Sensor misst in parts per billion (ppb), erkennt also, wie viele von einer Milliarde detektierten Teilchen Ozon sind. Dies macht jedoch keinen Unterschied im Bezug auf die Konzentrationskurve.

Den Bereich, in dem die Ozonkonzentration in der Erdatmosphäre am höchsten ist, nennt man Ozonschicht. Die Ozonschicht befindet sich je nach Definition, Jahreszeit und geographischer Breite in einer Höhe von ca. 15 - 25 Kilometern in der unteren Hälfte der Stratosphäre. Die Ozonschicht ist aufgrund ihrer strahlenschutzenden Eigenschaft

extrem wichtig für das Leben auf der Erde. Sinkt die Dicke der Ozonschicht auf weniger als die Hälfte ihrer ursprünglichen Dicke, spricht man von einem Ozonloch. Dieser Ozonabbau ist durch ozonabbauende Substanzen wie Chlor bedingt. Chlor und andere Stoffe wirken als Katalysator bei der Zerstörung von Ozon, werden dabei selber also nicht verbraucht. Es reicht schon eine kleine Menge von ozonabbauenden Stoffen in der Atmosphäre, um die Ozonschicht zu gefährden. Chlor gelangte z.B. über Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) in die Atmosphäre, was letztendlich zu deren Verbot führte [18].

Außerdem kann in bodennahen Bereichen auch eine erhöhte Konzentration von Ozon gemessen werden (s. Abb. 5.5). Dies ist dem sog. Sommersmog geschuldet, bei dem Ozon gebildet wird. Die Erzeugung eines freien Sauerstoffatoms erfolgt allerdings als in der Atmosphäre. Darauf soll hier nicht weiter eingegangen werden. Es ist aber durchaus möglich, dass diese Ozonkonzentrationserhöhung in Bodennähe auch mit der SBM nachgewiesen worden wäre.

Es bleibt also festzuhalten, dass sehr aussagekräftige Ergebnisse mit der SBM hätten erzielt werden können. Trotzdem kann aufgrund des bestehenden Wissens das komplexe Geschehen in der Erdatmosphäre relativ gut nachvollzogen werden, und z.B. die direkte Verbindung zwischen Ozongehalt und Temperatur erklärt werden.

5.4.2 Im Labor

Als Ausgleich für die nicht vorhandenen Ozonmesswerte wird untersucht, ob Ozon im Labor mit Hilfe von Strahlungsquellen erzeugt und nachgewiesen werden kann. Der Theorie nach müsste die energiereiche Alpha- oder Betastrahlung den Sauerstoff in der Luft auseinanderbrechen, sodass dann die Möglichkeit besteht, dass das einzelne Sauerstoffatom mit einem Sauerstoffmolekül wieder zu Ozon kombiniert. Es wurden zwei Messungen aufgenommen. eine mit einer Alphaquelle und eine mit einer Betaquelle. Dabei wurden die Quellen für eine gewisse Zeit mit dem Abstand d neben den Ozonsensor gehalten.

Als Alphaquelle fungierte das Americiumisotop ^{241}Am . Diese hat eine Aktivität von 333 kBq. Die emittierten Alphateilchen werden durch wenige Centimeter Luft abgeschirmt, weswegen die Quelle sehr nah am Sensor positioniert wird.

Wie in Abb. 5.6 zu sehen, steigt der Ozongehalt in der Luft um ca. 25 ppb an, wenn das ^{241}Am in einem Abstand von ca. einem Centimeter neben dem Sensor positioniert wird. Wird der Abstand zum Sensor verringert, und die Quelle direkt auf diesen gelegt, steigt der Ozongehalt um weitere ca. 15 ppb an. Wird die Quelle entfernt, sinkt der Ozongehalt relativ schnell auf 90 ppb ab. Es ist zu bemerken, dass der Sensor durch seine extreme Genauigkeit schon sehr kleine Unterschiede misst und z.B. Luftbewegungen auch dazu führen, dass sich der ermittelte Ozongehalt ändert. Trotzdem scheint es einen direkten Zusammenhang zwischen der Anwesenheit der Quelle und dem Ozongehalt zu geben, was darauf schließen lässt, dass mit Hilfe von Alphateilchen tatsächlich Ozon erzeugt wird.

Die Betaquelle war in diesem Fall das Strontiumisotop ^{90}Sr mit einer Aktivität von $3\ \mu\text{Ci}$, was 111 kBq entspricht. Die ausgesandten Elektronen haben in Luft eine relativ große Reichweite von bis zu einigen Metern, weswegen hier nicht darauf geachtet werden musste, dass sich die Quelle nah am Sensor befindet. Je größer jedoch der Abstand, desto geringer ist die Dichte der emittierten Elektronen in der Umgebung. In Abb. 5.7 ist zu sehen, dass der Ozongehalt beim ersten Heranführen der Quelle nicht merklich steigt, sondern eher um einen Wert an die 90 ppb stagniert. Erst wenn die Quelle

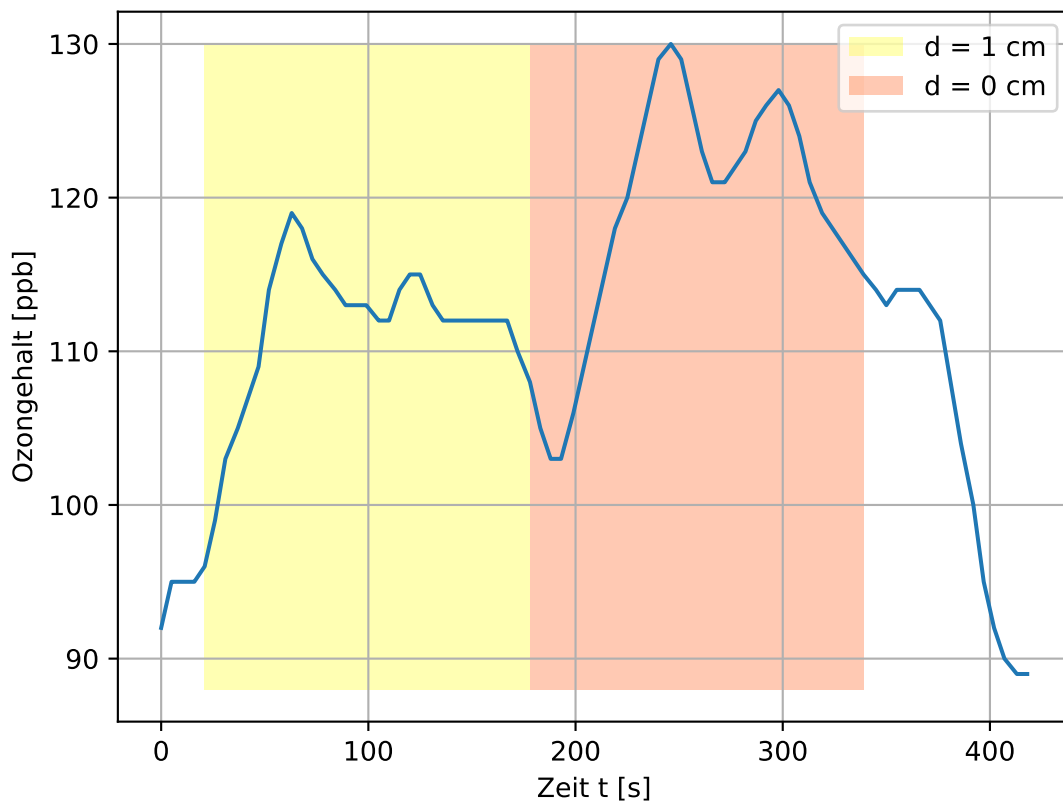


Abbildung 5.6: Verlauf des Ozongehalts in Luft mit einer Alphaquelle in der Nähe

komplett entfernt wird, sinkt der Ozongehalt auf ca. 46 ppb ab und steigt dann schnell wieder an, wenn die Quelle erneut in die Nähe gebracht wird. Hier ist auffällig, dass es für die Rate des Anstieges anscheinend nicht ausschlaggebend ist, in welcher Entfernung sich die Quelle befindet, obwohl dies eigentlich einen Unterschied machen sollte. Zwar steigt der Ozongehalt wieder auf fast 90 ppb, also auf den gleichen Wert, um den er bei der ersten Messung stagniert ist, jedoch hätte die Messung hier noch länger durchgeführt werden sollen, um zu untersuchen, ob der Ozongehalt noch weiter gestiegen wäre, oder ob er sich wieder bei etwa 90 ppb eingependelt hätte. Wenn dies passiert wäre, könnte mit einiger Sicherheit gesagt werden, dass sich das Gleichgewicht zwischen Ozonentstehung und Zerfall bei diesen 90 ppb befindet und damit unter dem Wert der benutzten Alphaquelle liegt. Das könnte z.B. daran liegen, dass der geometrische Wirkungsquerschnitt des Stoßes bei Elektronen sehr viel kleiner ist als bei Alphateilchen und es somit seltener zu einer Spaltung von Sauerstoffmolekülen kommt. Auch könnte es an der dreimal kleineren Aktivität der Betaquelle liegen.

Um solche Aussagen mit sicherer Wahrscheinlichkeit treffen zu können, sind die hier vorliegenden Messdaten zu ungenau. Es hätte außerdem ein Referenzozonwert gemessen werden müssen, also der Ozonwert ohne Anwesenheit einer Quelle, um eine bessere Aussage über die Ozonentstehung treffen zu können. Dies war jedoch nicht der Anspruch dieses Experimentes, da nur qualitativ untersucht werden sollte, ob mit einer Strahlungsquelle Ozon erzeugt werden kann. Dies kann anhand der Daten verifiziert werden und es ist zu sehen, dass sowohl Beta- als auch Alphastrahlung in Luft Ozon erzeugen können. Es wäre möglich, noch weitere Berechnungen anzustellen und mit den angegebenen

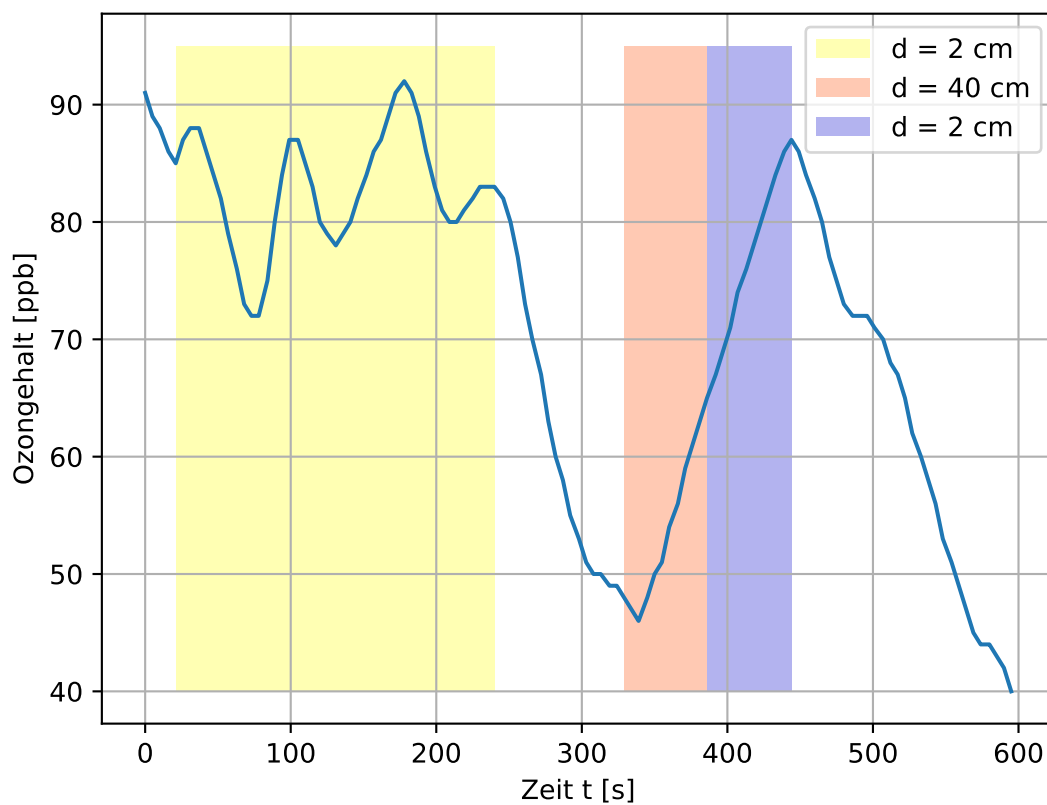


Abbildung 5.7: Verlauf des Ozongehalts in Luft mit einer Betaquelle in der Nähe

Aktivitäten der Strahlungsquellen zu untersuchen, mit welcher Wahrscheinlichkeit es zur Ozonerzeugung kommt, wenn der Anstieg des Ozongehalts pro Zeit bekannt ist. Dies soll hier jedoch nicht weiter behandelt werden.

Kapitel 6

Fazit und Ausblick

Rückblickend betrachtet ist die Stratosphärenballonmission trotz einer relativ kurzen Vorbereitungszeit sehr erfolgreich verlaufen und hat interessante wissenschaftliche Daten geliefert. Einzig der missglückte erste Start, der in einem Verlust der Ozonmessung resultierte, ist etwas bedauerlich. Gemessene Daten wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftdruck spiegeln das in Kap. 2.1 vorgestellte Modell der Erdatmosphäre sehr gut wider. Der Druckverlauf konnte außerdem sehr gut mit dem Modell der barometrischen Höhenformel verglichen werden. Obwohl keine experimentell ermittelten Ozondaten zur Verfügung standen, konnte die Lage der Ozonschicht theoretisch begründet und ein Zusammenhang zur Temperatur hergestellt werden. Außerdem war die Ozonmessung mittels Strahlungsquellen erfolgreich, wobei hier in Zukunft noch weitere genauere Messungen durchgeführt werden können.

Dies zeigt, dass eine Low-Budget Mission mit einem Stratosphärenballon sehr interessante und wichtige Daten liefern und in nicht allzu langer Zeit erfolgreich durchgeführt werden kann. Zurzeit wird deswegen ein weiterer Ballonflug geplant, bei dem neue Experimente durchführen werden sollen. Dabei wird zugleich auf die Ergebnisse der hier behandelten Mission aufgebaut und gewonnene Erkenntnisse werden verwendet, um eine reibungslose Vorbereitung und einen erfolgreichen Ablauf zu gewährleisten. Dabei ist es vor allem darauf zu achten, dass der Ballon sorgfältig befüllt wird und vor dem Start getestet wird, ob der vorhandene Auftrieb ausreicht. Außerdem muss auf eine sichere Verbindung der elektronischen Komponenten geachtet werden. Sollten weitere Ozonmessungen mit Strahlungsquellen durchgeführt werden, ist es wichtig, dass über einen längeren Zeitraum und ein Referenzwert des Ozongehalts ohne anwesende Strahlungsquelle gemessen wird.

Kapitel 7

Quellen

- [1] <https://www.spiegel.de/wissenschaft/weltall/neuer-rekord-nasa-ballon-stieg-auf-49-kilometer-hoehe-a-211145.html> 13.01.2021
- [2] <https://www.nationalgeographic.com/science/article/where-is-the-edge-of-space-and-what-is-the-karman-line> 21.01.2021
- [3] <https://www.eskp.de/klimawandel/turmhohe-forschungsballons-messen-ozonschicht-935565/> 13.01.2021
- [4] <https://www.az-delivery.de/products/gy-bme280description> 08.03.2021
- [5] <https://www.dfrobot.com/product-2005.html> 08.03.2021
- [6] <https://www.stratoflights.com/shop/wetterballon-komplettset/> 08.03.2021
- [7] <https://www.stratoflights.com/tutorial/helium-rechner/> 11.03.2021
- [8] <https://www.stratoflights.com/tutorial/flugroutenvorausberechnung/> 11.03.2021
- [9] <https://www.stratoflights.com/tutorial/datenlogger-auswertung/> 11.03.2021
- [10] <https://www.hlnug.de/themen/luft/allgemeines/zusammensetzung-der-luft> 12.03.2021
- [11] <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=102672lv3=102820> 12.03.2021
- [12] <https://www.planet-wissen.de/natur/klima/erdatmosphaere/pwieaufbaudererdatmosphaere100.html> 12.03.2021
- [13] https://www.gerd-pfeffer.de/atm_strato.html 12.03.2021
- [14] https://www.gerd-pfeffer.de/atm_meso.html 12.03.2021
- [15] <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/normaldruck/10415: :text>
Normaldruck%2C%20vereinbarter%20fester%20Gasdruck%2C
%20der,325%20Pa%20%3D%201%2C013%2025%20bar 14.03.2021

[16] http://www.pci.tu-bs.de/aggericke/PC2/Kap_II/Chapman-Mechanismus.htm 15.03.2021

[17] <https://atmosphere.copernicus.eu/ozone-layer-and-ultra-violet-radiation> 15.03.2021

[18] <https://www.planet-wissen.de/natur/klima/klimawandel/ozon-106.html> 15.03.2021

[19] https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Atmosph%C3%A4re_Stufen.svg 19.03.2021