

Experimente in der Stratosphäre

Frederik Georgius



Lukas Ungefug

Johannes Möller

Schüler des Jahrgangs 12 der Cäcilienchule Wilhelmshaven

Betreuende Mitglieder

Thomas Eberhardt, Lehrer an der
Cäcilienchule

Christoph Friedrich, ehemaliger Schüler und
Geoinformatik-Student an der Universität Münster

Website: www.strato-fische.jimdo.com

Kontakt: strato.fische@web.de

Inhalt

1	Die Vorgeschichte	1
2	Die Ziele unserer zweiten Mission	1
3	Die Nutzlast	1
4	Der Starttag	2
5	Die Radioaktivitäts-Auswertung	3
5.1	Theorie der Abschirmung	3
5.2	Abschirmung von Alpha- und Betastrahlung	3
5.3	Abschirmung von Gammastrahlung	3
5.4	Betrachtung zu den Bodenversuchen	3
5.4.1	Vergleichbarkeit der Geiger-Müller-Zählrohre	4
5.4.2	Vergleich der Abschirmmaterialien	5
5.5	Abschirmung der Plexiglasbox und Prognose zur Abschirmung	6
5.6	Pftzer-Maximum	7
5.7	Biologische Auswirkung von Strahlung	7
5.8	Kosmische Strahlung	7
6	Die Temperatur-Auswertungen	8
7	Betrachtung der Geschwindigkeiten	9
7.1	Steiggeschwindigkeiten	9
7.2	Horizontalgeschwindigkeiten	10
8	Prüfung der Höhenformeln	11
9	Reflexion	13
9.1	Der erste Start	13
9.2	Der zweite Start	13
9.3	Fazit	14
9.4	Lösungsideen	14
9.4.1	Start	14
9.4.2	Verbindungen/Platzierungen	14
10	Quellen	16

1 Die Vorgeschichte

Unser Team, *die Stratofische*, startete ursprünglich 2017 im Schülerwettbewerb *Stratosat* der Ludwigs-Maximilian-Universität München und des Deutschen Luft- und Raumfahrtzentrum (*DLR*) Oberpfaffenhofen (bei München). Dessen Ziel war es, dass die zehn ausgewählten Teams, zu denen auch wir gehörten, jeweils einen Wetterballon mit einer selbst gewählten Mission starten. Am 16. August 2017 haben wir unseren ersten Wetterballon gestartet. Die gesammelten Daten haben wir für den Wettbewerb in München ausgewertet und eine Ausarbeitung angefertigt. Mit den gewonnenen Erkenntnissen wollten wir aber auch beim Jugendforschert-Wettbewerb antreten, sodass sich unser Team dafür in zwei kleinere Gruppen teilen musste, da es ursprünglich aus fünf Schülern bestand.

Unsere Projekte „Eine Forschungsmission in der Stratosphäre“ und „Die radioaktive Aktivität im Verlauf der Höhe bis in die Stratosphäre“ waren wir im Regionalwettbewerb Emden in der Sparte Geo- und Raumwissenschaften erfolgreich.

2 Die Ziele unserer zweiten Mission

Unsere Mission hat sich seit dem letzten Start stark verändert sowie auch unser Team, welches nur noch aus drei statt aus fünf Schülern besteht.

Auch wenn wir dieses Mal alle Daten so gut wie möglich auswerten wollen, so liegt unser Augenmerk auf den Radioaktivitätsdaten. Unser Forschungsauftrag beinhaltet die Suche nach leichten Materialien, die gut radioaktive Strahlung abschirmen. Inspiriert zu diesem Forschungsauftrag wurden wir durch die immer weiter fortschreitende Raumfahrtindustrie, die selbst nach solchen Materialien für ihre Langzeitmissionen sucht, um Astronauten vor gesundheitlichen Schäden durch die hochenergetische kosmische Strahlung zu schützen.

Außerdem gelang uns eine Kooperation mit dem DLR Bremen, welche uns eine Nutzlast zur Ortung des Ballons über Funk ermöglichte. Mit diesen gesammelten Daten sollte es möglich sein, zuverlässige Höhen- und Geschwindigkeitswerte zu erhalten. Diese Auswertung war bei der ersten Mission nur begrenzt möglich.

Anhand der diesmal durchgängigen Höhenmessung wollen wir auch die Genauigkeit unserer in der ersten Mission hergeleiteten Höhenformel überprüfen.

Unsere Ziele lassen sich in folgender Reihenfolge priorisieren:

- Aspekte zur Abschirmung kosmischer Strahlung
- Überprüfung unserer eigenen Höhenformel aus der ersten Mission
- Verbesserung der Temperatur-Datenerfassung
- Geschwindigkeitsermittlungen während des Fluges

Auch wenn unser Start nicht ganz reibungslos verlief, ist es uns möglich allerlei Daten auszuwerten, einen Erkenntnisgewinn und einen Lerneffekt vorzuweisen und unsere Erfahrungen für mögliche Nachfolgemissionen aufzubereiten.

3 Die Nutzlast

Dieses Kapitel soll beschreiben, welche Messinstrumente wir benutzten. Insgesamt hatten wir drei Sensorboards in der Nutzlast und drei Kameras. Zwei Sensorboards waren selbstkonstruiert und basieren auf einem Arduino-Mikrocontroller. Das erste Sensorboard, die *SenseBox*, hatte neben einem Geiger-Müller-Zählrohr der Firma Libellium noch Sensoren für Luftfeuchtigkeit und -druck, Temperatur für innen und außen, Helligkeit und UV und einem GPS-Modul. Das zweite selbstkonstruierte Sensorboard, welches im Bereich der

Auswertungen als *Geiger-Board* bezeichnet wird, wurde nur für das angeschlossene Geiger-Müller-Zählrohr (auch von der Firma Libellium) aufgebaut.

Das dritte Sensorboard ist ein fertiges gewesen. Dieses haben wir bei *stratoflights* bestellt. Dieser Shop hat sich auf Wetterballonflüge spezialisiert. So besitzt das Sensorboard, welches wir als *Stratoboard* bezeichnen, Sensoren für Luftdruck, Temperatur, Geschwindigkeit (horizontal sowie die Steiggeschwindigkeit) und ein entsperres GPS-Modul, welches die Höhe auch noch oberhalb von 10.000 m loggt. Mit unserer Mission wollten wir auch die Qualität dieses kommerziellen Tools für weitere Missionen testen.

Zusätzlich war an unserem Ballongespann die Nutzlast des DLR Bremen, welche über Funk Daten über GPS-Standort, Höhe und den Geschwindigkeiten übermittelte und diese konnten live verfolgt werden. Aber auch diese wurden gespeichert und standen uns zur Auswertung zur Verfügung.

Die Stromversorgung wurde entweder durch die geräteeigenen Akkus, durch Powerbanks oder durch Batterien gewährleistet.

4 Der Starttag

Am 28. November sollte unser zweiter Starttag sein. Das Wetter war winterlich kalt und dennoch war unsere Schulgemeinschaft vor Ort am Banter-See-Park in Wilhelmshaven, um dem Event beizuwohnen. Das gesamte (also alle Stratofische) Team war zur Startunterstützung dabei. So kümmerten sich die Schüler um den finalen Zusammenbau der Nutzlast, um das Befüllen des Ballons und um das Verbinden der einzelnen Boxen, des Fallschirms und des Ballons. Das Befüllen des Ballons erwies sich als besonders kompliziert, da starke Windböen den Ballon erfassten und mehrere Schüler den Ballon in einer sicheren Position halten mussten.

Zum Glück waren auch „Nachwuchs-Stratofische“ zugegen, die dem Team über die Schulter schauten und unterstützend zur Seite stehen sollten. Zwei Mitarbeiter des DLR Bremens waren auch anwesend und schalteten ihre Nutzlast ein. Als der Ballon befüllt war und alles miteinander verbunden war, sollte der Start vonstattengehen. Mit einem Countdown sollte der Ballon langsam in den Himmel abgeseilt werden. Dies sollte einen abrupten Start und eine starke Erschütterung der Nutzlast verhindern. Doch leider riss die Schnur des Ballons. Dieser flog also ohne Nutzlast in den Himmel. Während unsere Schulgemeinschaft enttäuscht wieder zum Schulgelände zurückkehrte, besorgten wir nochmal genügend Ballongas und neue Leinen. Wir hatten nämlich einen Ersatzballon. Ein Verschieben des Startes war nicht möglich, da für die nächsten Tage schlechteres Wetter vorhergesagt wurde und wir auch unsere Startgenehmigung nicht hätten verschieben können. Eine Kooperation mit dem DLR wäre dann nicht mehr möglich gewesen. Als der zweite Ballon befüllt und alles mit stärkeren Schnüren verknotet war, konnten wir im kleineren Kreis starten. Auch wenn wir den Ballon wieder abseilen wollten, war dieser Start mit Turbulenzen verbunden. Ein Teammitglied verhakte sich mit unserer Nutzlast. Diese war einer Erschütterung ausgesetzt und die Nutzlast des DLR erlitt einen Bodenschlag. Die Startuhrzeit lag in der Mittagszeit.

Die Suche war diesmal einfacher, ließ sich der Ballon ja live über Funk verfolgen (bzw. die daraus gewonnenen GPS-Daten ließen sich live über eine Website verfolgen). Gefunden wurde der Ballon auf einem freien Feld in der Nähe von Visselhövede. Nachdem wir die Nutzlast, die Reste des Ballons und den Fallschirm eingesammelt haben, haben wir die Daten in einer ruhigen Pizzeria gesichtet. Dort hat sich leider bestätigt, was wir nach der ersten Begutachtung der Nutzlast befürchteten. Beim Start haben sich die Kabel der Geiger-Müller-Zählrohre von den Sensorboards gelöst und haben keine Daten geloggt. Zwei der drei Kameras sind verrutscht und haben das Innere der Box statt der Aussicht fotografiert und die dritte intakte Kamera

fotografierte die Aussicht leider ohne Maskottchen, da dieses beim Start abgebrochen war. Trotz allem war dieser Tag wieder voll von Erfahrungen und dementsprechend viel haben wir gelernt.

5 Die Radioaktivitäts-Auswertung

Obwohl keine Daten während des Fluges gesammelt wurden, ist es dennoch möglich aufgrund der Bodenversuche, eine grobe Voraussage zu machen. Dazu wird natürlich einerseits die Theorie hinter der Abschirmung kurz erläutert und dann die schon gesammelten Daten ausgewertet.

5.1 Theorie der Abschirmung

Da wir mit den Zählrohren die Abschirmung der kosmischen Gammastrahlung auswerten wollen, ist eine Abschirmung der Alpha- und Betastrahlung (da diese ganz bzw. größtenteils von der Box abgeschirmt werden) in der Höhe nicht erforderlich. Da jedoch die Versuche am Boden mit radioaktiven Strahlern abliefen, die sowohl Alpha- als auch Beta- und Gammastrahlung absondern, wird auf deren Abschirmung auch kurz eingegangen.

5.2 Abschirmung von Alpha- und Betastrahlung

Alphastrahlung verliert schon auf kurzer Strecke einen Großteil ihrer Energie, weswegen sogar Papier ausreichend wäre, um das meiste abzuschirmen. Da die Geiger-Müller-Zählrohre in einer Glasröhre sind, lässt sich diese nicht messen.

Die Betastrahlung lässt sich schwächen, indem man sie mit Materie wechselwirken lässt. Ionisation und Bremsstrahlung haben dabei den größten Einfluss. Der Effekt der Abschirmung der Strahlung wird bei größerer Dichte des Materials sowie höherer Ordnungszahl größer. Jedoch ist die Bremsstrahlung von Materialien mit großer Ordnungszahl energiereicher, weswegen es effektiver ist, erst ein Material zu nutzen, welches eine geringere Ordnungszahl hat, damit es eine schwächere Bremsstrahlung abgibt, die dann von einem Material mit höherer Ordnungszahl absorbiert wird.

5.3 Abschirmung von Gammastrahlung

Die Gammastrahlung lässt sich nicht vollständig abschirmen. Zur Abschirmung wird die Halbwertschicht von Materialien angegeben, die angibt, nach welcher Dicke des Materials, die von der Strahlung durchquert wird, die Intensität halbiert wird. Eine höhere Dichte und eine höhere Ordnungszahl sorgen hier ebenfalls wie bei der Betastrahlung für eine bessere Abschirmung. Die Halbwertschicht hängt von der Energie der Betastrahlung ab, da je nach Energie unterschiedliche Effekte eine wesentliche Rolle bei der Schwächung der Strahlung spielen. Bei geringen Energien hat der Photoeffekt, bei dem Elektronen aus der Atomhülle gelöst werden, den größten Anteil der Schwächung. Bei 100 keV bis Energien von mehreren Megaelektronenvolt dominiert der Compton-Effekt, bei dem die Strahlung durch Streuung an einem Elektron seine Wellenlänge vergrößert. Bei höheren Energien kommt es zur Paarbildung, bei der ein Photon zu einem Elektron und einem Positron umgewandelt wird. Da die kosmische Gammastrahlung mehr als 300 keV besitzt, kommt es eher zum Compton-Effekt und zur Paarbildung.

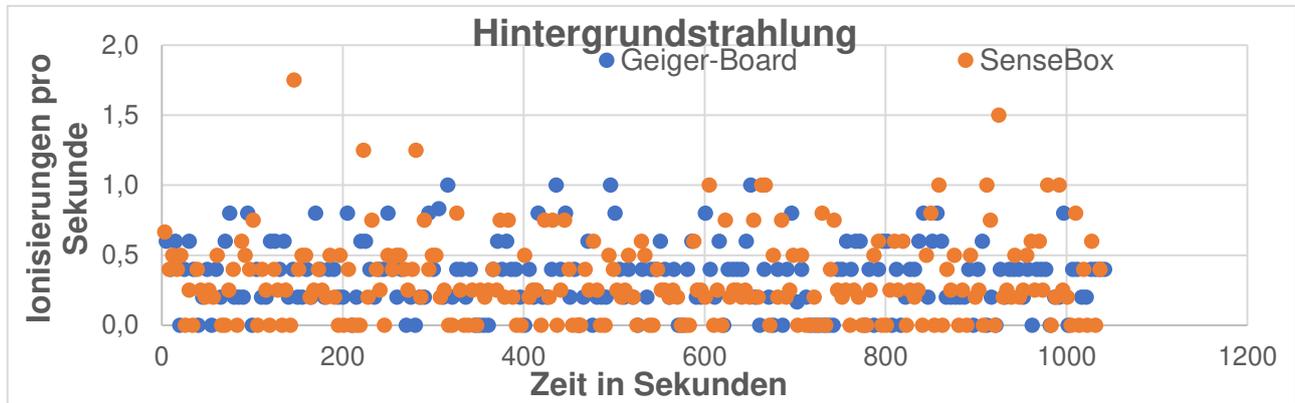
5.4 Betrachtung zu den Bodenversuchen

Durch die Versuche am Boden lässt sich eine Aussage über die Vergleichbarkeit der beiden Zählrohre sowie über die Eignung von bestimmten Materialien als Abschirmmaterial treffen.

5.4.1 Vergleichbarkeit der Geiger-Müller-Zählrohre

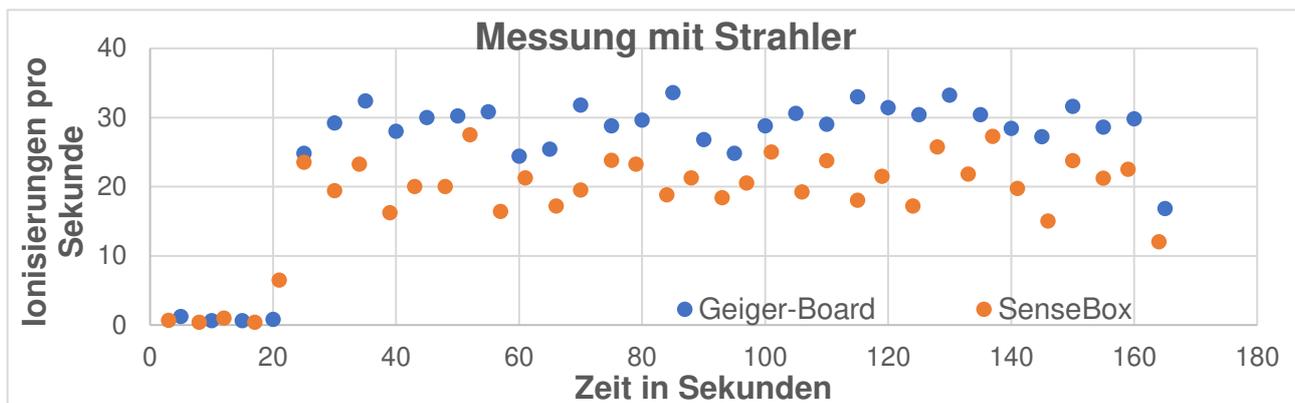
Da beide Sensorboards in unterschiedlichen Zeitabständen Werte lieferten, wurde die Anzahl der gemessenen Ionisation im Zeitintervall durch die Dauer des Intervalls geteilt, wodurch die Aktivität in Becquerel verglichen werden kann. Aus dem folgenden Diagramm der Messung der Hintergrundstrahlung lässt sich entnehmen, dass beide Geiger-Müller-Zählrohre ähnliche Werte liefern, wobei jedoch einige Werte des Geiger-Boards weitaus höher als die anderen sind. Im Durchschnitt sind die Werte von der SenseBox um 6 % geringer.

5



Für die Messung mit Strahler wurden beide Sensorboards nebeneinander platziert und mit einem Strahler bestrahlt. Die Messwerte von der Messung vom Strahler hingegen weisen eine Diskrepanz auf. Hier ist die Aktivität ersichtlich unterschiedlich. Jedoch sind die Werte bevor und nachdem der Strahler auf die Zählrohre gerichtet wurde erneut ähnlich. Es ist somit möglich, dass der Strahler nicht genau zur Mitte der Materialien zeigte, sondern zum Geiger-Board tendierte.

10



Im Bereich, wo der Strahler aufgestellt war, sind die Werte des Geiger-Boards um 28,5 % größer. Im Folgenden wird für die durchschnittlich gemessene Aktivität des Strahlers ohne Abschirmung der Durchschnittswert beider Sensorboards genommen (25,18 Bq), wobei noch die gemittelte Hintergrundstrahlung (0,33 Bq) abgezogen wird, da die Zählrohre nur von einer Seite abgeschirmt wurden. A_0 ist somit 24,85 Bq.

15

5.4.2 Vergleich der Abschirmmaterialien

Damit es möglich ist, die Materialien zu vergleichen, wird die Halbwertschicht $d_{1/2}$ der jeweiligen Materialien annähernd bestimmt. Da die Gammastrahlung prozentual abnimmt, gilt für die Intensität A in Abhängigkeit zur Dicke d des Materials:

$$5 \quad A(d) = A_0 * 0,5^{\frac{d}{d_{1/2}}}$$

Wenn nach $d_{1/2}$ aufgelöst, erhält man:

$$d_{1/2} = \frac{d}{\log_{0,5}\left(\frac{A}{A_0}\right)}$$

Es ist jedoch zu beachten, dass diese Werte für die Halbwertschicht nur als Orientierungswert betrachtet werden können. Das liegt daran, dass diese Formel nur für die Gammastrahlung gültig ist. Da nicht bekannt ist, wie viel Betastrahlung des Strahlers am Zählrohr genau ankommt, lässt sich dadurch nur eine Annäherung der Halbwertschicht bestimmen. Außerdem ist es problematisch, dass bei einigen Versuchsdurchgängen, wie erwähnt, unterschiedliche Werte ausgegeben wurden. Somit lässt sich nur ein Bereich bestimmen, wo die Halbwertschicht liegen könnte. Zusätzlich ist die Strahlung nicht rein, sondern ein Gemisch aus Strahlung unterschiedlicher Energien, wodurch ein Vergleich mit Literaturwerten, die nach Energien aufgeteilt sind, schlecht möglich ist. Außerdem schirmt das Glasrohr der Zählrohre auch ab, da diese kein Glimmerfenster haben.

In der folgenden Tabelle sind einige Ergebnisse unserer Vorversuche aufgelistet, sowie deren Dicke und Halbwertschicht. Da jeweils beide Sensorboards für alle Materialien benutzt wurden, wurde der Durchschnittswert aus den jeweiligen Messreihen für ein Material benutzt. Von diesen Durchschnittswerten der Aktivität wurde die (gemittelte) Hintergrundstrahlung bereits abgezogen. Die genutzten Materialien wurden entweder aus der Physiksammlung der Schule entnommen oder im Baumarkt gekauft.

Material	Dicke (in mm)	Aktivität (in Bq)	$d_{1/2}$ (in mm)
Aluminium, eine Platte (dick)	1	4,42	0,40
Aluminium, fünf Platten (dünn)	3	2,86	0,96
Plexiglas, durchsichtig	4	2,05	1,11
Schaumstoff	30	11,45	26,83
Plexiglas, grün	3	3,28	1,03
Bleiplatte	3	0,55	0,55
Holzplatte	3,5	10,47	2,80

Wie man erkennt, haben Blei und Aluminium die höchste Abschirmung, wobei überraschend ist, dass zwei stark unterschiedliche Werte für die Halbwertschicht von Aluminium aus den Messergebnissen berechnet wurde. Außerdem überrascht auch die hohe Abschirmung des Plexiglases, weswegen dieses für die Abschirmbox benutzt wurde, und auch da dieses leichter zu verarbeiten war, sowie das Risiko, dass durch eine Metallabschirmung die Sensor-Boards kurzgeschlossen werden, nicht existiert. Zudem ist es deutlich leichter als die getesteten Materialien mit vergleichbarer Abschirmung.

Aufgrund der Diskrepanz der Sensorboards bei der A_0 -Messung und der Tatsache, dass Aluminium besser abgeschirmt hat als Blei, wurde der Versuch sicherheitshalber wiederholt. Hierbei wurden nur Blei und Aluminium erneut getestet, da Blei aufgrund seiner deutlich höheren Dichte besser abschirmen sollte (dies wurde im ersten Versuch nicht durch die Daten angezeigt). Bei der zweiten Versuchsreihe wurde nur eines der beiden Zählrohre benutzt, dafür aber drei Messreihen durchgeführt. Außerdem haben wir die Platten-Anzahl verändert. Da aber die Halbwertsschicht berechnet wird, ist eine Veränderung der Dicke nicht von Bedeutung. Alle anderen Parameter blieben gleich. Zu sehen sind die Durchschnittswerte aus den Messreihen.

Material	Dicke (in mm)	Aktivität (in Bq)	$d_{1/2}$ (in mm)
Aluminium, sechs Platten	6,2	1,04	1,05
Blei, zwei Platten	2,5	0,94	0,41

In dieser zweiten Versuchsreihe schirmte Blei besser als Aluminium ab, was tatsächlich auch so ist.

Außerdem interessant ist die deutlich erhöhte Aktivität für eine weitere A_0 -Messung höhere Aktivität von 43,38 Bq. Dieser Anstieg der nicht abgeschirmten Aktivität ist vermutlich auf die zentrale Platzierung des einzelnen Zählrohres zurückzuführen. Durch die Verwendung eines statt zwei Zählrohren konnte das Messinstrument im Zentrum der Strahlrichtung platziert werden. Dies zeigt auf wie klein der Abstrahlwinkel ist und unterstützt die obige These, dass Messunterschiede zwischen den beiden Datenloggern aus ungenauer Platzierung des Strahlers hervorgehen.

5.5 Abschirmung der Plexiglasbox und Prognose zur Abschirmung

Um vorhersagen zu können, wie viel die Box aus Plexiglas abschirmt, wurde der Versuch mit ihr mehrmals wiederholt. Die Abschirmung aus Plexiglas konnten wir dank der Unterstützung des außerschulischen Lernortes Wilhelmshaven konstruieren und hatten somit eine stabile und gut verschlossene Box um das entsprechende Zählrohr bauen können. Zu sehen sind die Durchschnittswerte aus drei Messreihen:

Aktivität ohne Box und Strahler	Aktivität ohne Box, mit Strahler	Aktivität mit Box, ohne Strahler	Aktivität mit Box und Strahler	Abschirmung (relativ)
0,34 Bq	28,28 Bq	0,02 Bq	0,75 Bq	99,31 %

Die Plexiglasbox schirmt somit über 99 % der Strahlung von Radon 226. Das Energiespektrum von ^{226}Ra geht von 186 keV bis 2,45 MeV, wobei die höchste Intensität bei 351 keV und 609 keV ist (die Angaben entstammen dem Datenblatt für die in der Physiksammlung unserer Schule liegenden Strahler). Da die Energie der kosmischen Gammastrahlung höher als die des Strahlers ist, müsste die Abschirmung in der Stratosphäre niedriger sein. Grund dafür ist, dass die Abschirmung durch den Photo- und Compton-Effekt bei höheren Energien abnimmt. Jedoch nimmt die Abschirmung bei ca. 2 MeV zu, da dann die Paarbildung anfängt zu wirken. Die Abschirmung steigt aber langsamer an, als sie abgefallen ist. Es ist also zu vermuten, dass wenn man dann die Messwerte der beiden Zählrohre beim Flug vergleichen würde, dass die Abschirmung beim Anstieg des Ballons erst recht hoch sein wird, dann relativ schnell abfällt und dann wieder langsam ansteigt. Obwohl keine Daten während des Fluges gesammelt wurden, ist es dennoch möglich aufgrund der Bodenversuche, eine grobe Voraussage zu machen. Dazu wird natürlich einerseits die Theorie hinter der Abschirmung kurz erläutert und dann die schon gesammelten Daten ausgewertet.

5.6 Pftotzer-Maximum

Das sogenannte Pftotzer-Maximum ist ein Anstieg der radioaktiven Aktivität im Verlauf der Höhe in der Atmosphäre. Es liegt in einer Höhe von ungefähr 20 km. Vermutet wird, dass es sich dabei durch kosmische Strahlung ausgelöste Sekundärstrahlung handelt, die den Anstieg verursacht. Warum ausgerechnet dort dieses Maximum liegt, ist jedoch unklar, weshalb man darüber lediglich spekulieren kann.

5.7 Biologische Auswirkung von Strahlung

Um auch die biologische Auswirkung von radioaktiver Strahlung beurteilen zu können, wurden die Messergebnisse der ersten Mission betrachtet.

Mit Hilfe eines vom Hersteller des Zählrohres geeichten Faktor für einen bestimmten Strahler lässt sich die gemessene Aktivität in die Strahlendosis (in mSv/h) umrechnen und erhält damit auch die Strahlenbelastung pro Jahr. Trotz der Eichung auf einen bestimmten Strahler liefert der Umrechnungsfaktor erstaunlich gute Werte. In der Tabelle sind die Mittelwerte der Ionisationen im Zählrohr pro Minute von Auf- und Abstieg der letzten Mission in den einzelnen Höhenkilometer unterteilt. Die dazugehörige Strahlenbelastung pro Jahr befindet sich in der Spalte daneben.

Die höchste Strahlenbelastung hätte man also in den Höhenbereichen zwischen 19 km bis 21 km, in welchem auch das Pftotzer-Maximum liegt. Zum Vergleich: der Grenzwert für eine jährliche Strahlenbelastung für Menschen in Deutschland liegt bei 20 mSv. Die durchschnittliche jährliche Strahlendosis für in Deutschland Lebende liegt zwischen 2 mSv bis 3 mSv. Es liegt also in den entsprechenden Höhen eine Vervielfachung von ca. 20 Mal höheren Werten vor. Für Erwachsene sind deterministische Schäden (meint Schäden, die bei entsprechender Strahlenbelastung auf jeden Fall auftreten, z.B. Hautrötungen, Haarausfall oder bei Ungeborenen Fehlbildungen oder Fehlentwicklung des Gehirns; dazu zählen jedoch nicht Spätfolgen wie Krebs etc., da diese stochastisch auftreten und sich nicht auf eine erhöhte Strahlenbelastung zurückführen lassen) erst ab 500 mSv zu erwarten. Für Ungeborene liegt der Wert jedoch schon bei 50 mSv bis 100 mSv.

Höhe (in km)	Aktivität (in Ion./min)	Jahresbelastung (in mSv/Jahr)
0-1	15,6	1,1
1-2	17,1	1,2
2-3	25,4	1,8
3-4	33,6	2,4
4-5	40,6	2,9
5-6	66,3	4,7
6-7	98,9	7,0
7-8	142,4	10,1
8-9	210,9	15,0
9-10	280,9	20,0
10-11	361,2	25,7
11-12	457,7	32,6
12-13	538,0	38,3
13-14	618,3	44,0
14-15	669,4	47,6
15-16	709,7	50,5
16-17	762,0	54,2
17-18	801,2	57,0
18-19	799,7	56,9
19-20	825,7	58,7
20-21	824,6	58,7
21-22	805,3	57,3
22-23	800,4	56,9
23-24	764,7	54,4
24-25	736,4	52,4
25-26	733,7	52,2

5.8 Kosmische Strahlung

Die kosmische Strahlung besteht vorrangig aus Protonen, Alphateilchen aber auch geladenen Atomkernen von Kohlenstoff über Sauerstoff bis Nickel. Die Herkunft der Strahlungsteilchen ist jedoch unklar und kann je nach Energien des Teilchens unterschiedlich sein. Die größeren

Strahlungsteilchen werden aufgrund ihrer hohen Ladungszahl entweder früh vom Erdmagnetfeld abgelenkt oder wegen ihrer hohen Masse weit oben in der Atmosphäre abgefangen. Vorrangig Protonen schaffen es sogenannte Sekundärstrahlung zu erzeugen. Dabei treffen die hochenergetischen Protonen auf den Atomkern

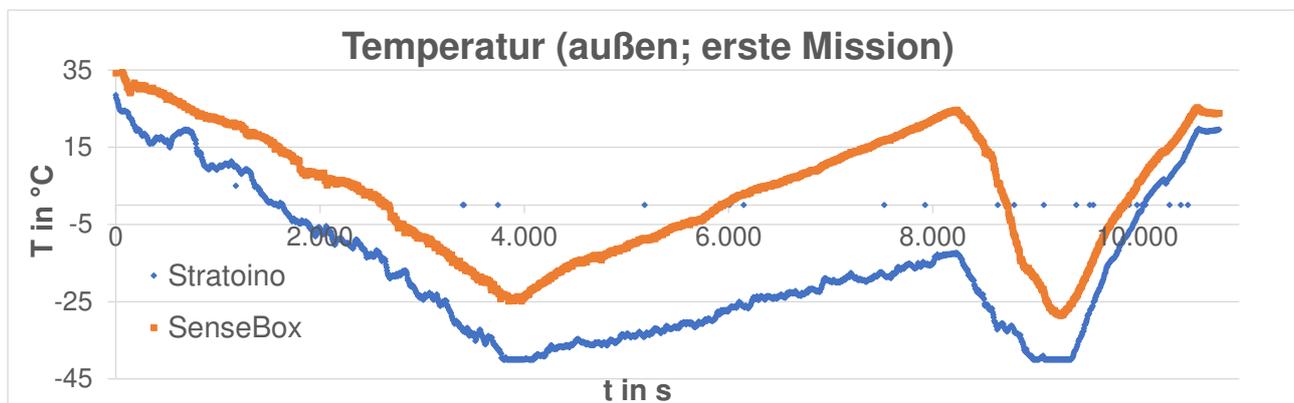
eines Atoms in der Luft. Bei dieser Proton-Kern-Kollision sorgen verschiedene Wechselwirkungsprozesse für die Entstehung der Sekundärstrahlung.

6 Die Temperatur-Auswertungen

Da an unseren zwei Sensorboards auch Temperatur-Sensoren für innen- und außerhalb der Nutzlast angeschlossen waren, bietet es sich an diese zu betrachten. In den vorherigen Projekten war die Temperatur-Auswertung ein großer Bestandteil der Ausarbeitung. Allerdings hat sich unsere Mission deutlich verändert, womit die Betrachtungen zur Temperatur nur einen kleinen Teil der Arbeit einnehmen sollen.

Auch bei unserer letzten Mission hatten wir zwei Sensorboards in Benutzung. Das eine, die SenseBox genannt, haben wir übernommen und das andere (der *Stratoino*) durch eine professionelle Variante (das Stratoboard) ersetzt und aufgewertet.

Ein Hauptproblem in den letzten Projekten waren fehlerhafte Temperaturdaten. Aufgrund eines Konstruktionsfehlers wurde der außenliegende Temperatur-Sensor der SenseBox während des Fluges dauerhaft von der Sonne beschienen. Dieser Fehler ließ sich im Nachhinein daran feststellen, dass die Temperatur-Kurve der SenseBox konstant über der Kurve des Stratoinos. Das nachfolgende Diagramm zeigt die Temperatur-Daten (außen) unserer ersten Mission in Abhängigkeit zur Flugzeit:



Zweierlei wird an diesem Graphen deutlich:

1. Der angesprochene Konstruktionsfehler wird hier in seiner vollen Tragweite ersichtlich. Die Graphen divergieren bis zu einer Spanne von ca. 40 °C. Bei einem Temperatur-Bereich von -40 °C bis 25 °C ist diese Divergenz sehr hoch.

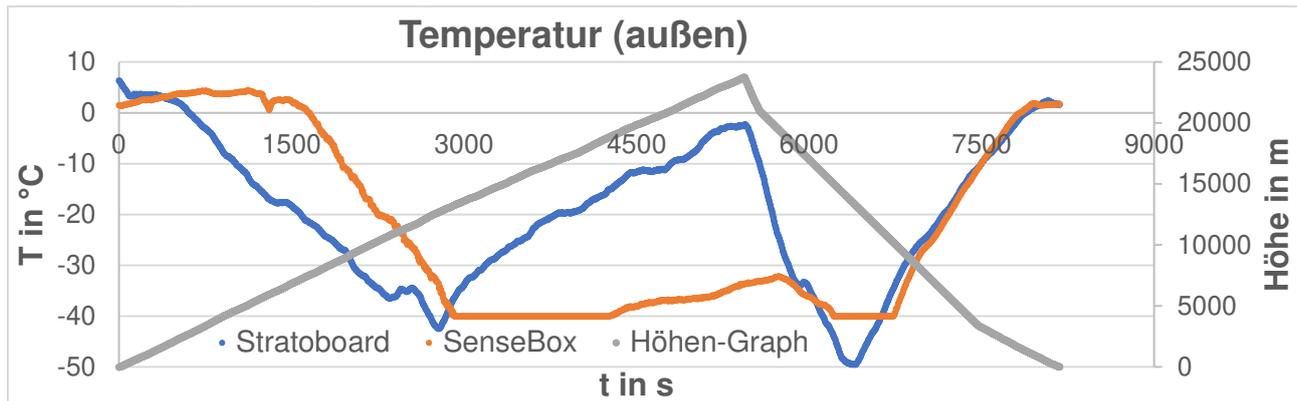
2. Der Sensor des Stratoino hat bei diesem Flug seine Messgrenzen erreicht. So zeigen die geraden Kanten ($T = -40$ °C; $t \approx 4000$ s und $t \approx 9000$ s) diese deutlich. Eine Aufbesserung war demnach naheliegend.

Im Zuge unserer zweiten Mission sollten natürlich beide Probleme gelöst werden.

Das erste Problem sollte mit einer verbesserten Sensor-Abdeckung gelöst werden. Das Sensorboard SenseBox war vor dem ersten Start in der Projektarbeit entstanden und sollte deshalb auch wieder mitfliegen (der Stratoino wurde für einen anderen Schülerwettbewerb gestellt). Dies war auch unabdingbar, da an das selbst konstruierte Sensorboard auch eines der beiden genutzten Geiger-Müller-Zählrohre angeschlossen wurde. Dank der freundlichen Unterstützung des außerschulischen Lernortes Wilhelmshaven, deren 3D-Druck-Software und -hardware wir nutzen durften, war es möglich eine verbesserte Sensor-Abdeckung zu drucken.

Durch einen Austausch des Stratoino durch ein professionelles für Wetterballon-Flüge entwickeltes Sensorboard, das Stratoboard, sollte das zweite Problem behoben werden. Die Sensoren des Stratobords waren als dafür geeignet ausgeschrieben und auch deren Messbereich war deutlich größer.

Dieses Diagramm zeigt die Temperatur-Daten unserer letzten Mission in Abhängigkeit von der Flugzeit. Zusätzlich ist auf einer rechten Y-Achse die Höhe der Nutzlast in Abhängigkeit von der Flugzeit aufgetragen, die durch den grauen Graphen dargestellt ist.



Der Verlauf der beiden Kurven ähnelt sehr dem Verlauf der ersten, gesammelten Temperatur-Daten. So ist der typische Verlauf der Temperatur bei einer Wetterballonmessung zu erkennen. Darüber hinaus sind auch hier wieder Probleme aufgetreten:

1. Auch der Sensor der SenseBox hat seine Messgrenze erreicht. Auch sie liegt bei $T = -40\text{ °C}$. Diese ist an den geraden Kanten des SenseBox-Graphen erkennbar (z.B. $t \approx 3000\text{ s}$ bis $t \approx 4500\text{ s}$).
2. Im Vergleich mit den Stratoboard-Daten fällt wieder eine Divergenz der SenseBox-Daten auf (diesmal jedoch nicht durchgehend). Diese lässt sich eventuell wieder mit einer fehlerhaften Sensor-Abdeckung erklären. Das Material der Sensorabdeckung war dunkel gefärbt, weswegen es sich durch Sonnenlicht erwärmt haben könnte.

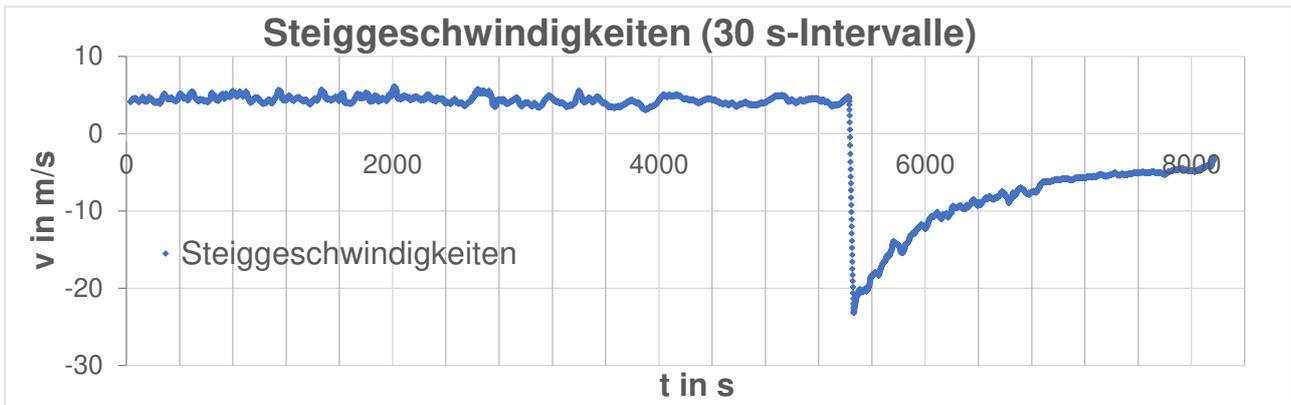
Zudem hat ein Vergleich mit anderen Wetterballonflügen ergeben (benutzt wurde eine Datenbank der Universität Wyoming, die die Daten der regelmäßig stattfindenden Starts der Radiosonden sammelt und öffentlich zugänglich macht), dass die gemessenen Außentemperaturen (auch des Stratoboards) zu hoch sind. Vor allem deutlich zu hohe Temperatur auf der Platzhöhe des Ballon ist signifikant. Dies lässt sich unter anderem durch die Wärmeabstrahlung der technischen Bauteile innerhalb der Nutzlast erklären. Ein Vergleich der Innen- und Außentemperaturen unterstützt diese These, dass die Wärmeabstrahlung der Technik dabei eine Rolle spielt, da die Differenz beider Temperaturen am kältesten Punkt etwa 50 °C beträgt. Diese Differenz ist groß und lässt sich eben mit der Wärmestrahlung der Technik erklären. Um dies in nachfolgenden Missionen zu verhindern, könnte man über eine Art Gerüst an der Nutzlast die Sensoren weiter entfernt von der Technik und somit besser isoliert lagern.

7 Betrachtung der Geschwindigkeiten

Dank der Zusammenarbeit mit dem Deutschen Luft- und Raumfahrtzentrum Bremen hatten wir durchgehende sekundengenaue Positionsdaten. Dadurch war es möglich die Geschwindigkeiten (Horizontal- sowie Aufstiegs- und Abstiegsgeschwindigkeiten) zu berechnen.

7.1 Steiggeschwindigkeiten

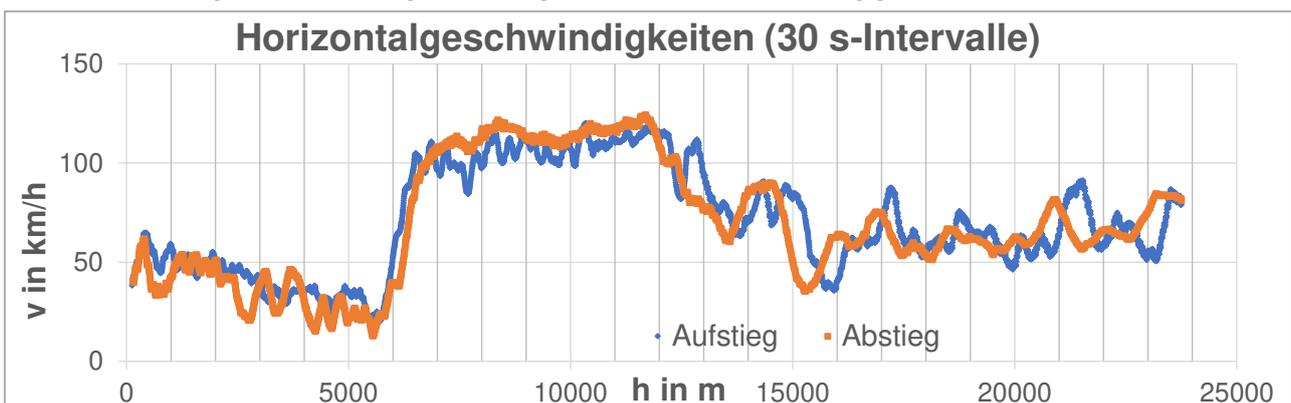
Für einen Wetterballon-Flug sind zwei Geschwindigkeiten von Bedeutung. Einerseits bewegt sich der Ballon horizontal zum Erdboden und andererseits steigt der Ballon auf. Zum ersten werden die Steiggeschwindigkeiten (mit Steiggeschwindigkeiten sind sowohl positive [Steigen] als auch negative [Sinken] Geschwindigkeiten gemeint) betrachtet.



Für die Betrachtungen wurden in 30 s-Intervallen Mittelwerte gebildet. Dadurch ist die Kurve deutlich glatter. Interessant ist, dass der Ballon mit einer beinahe konstanten Geschwindigkeit von $v \approx 4,4 \text{ km/h}$ steigt. Es wurde nämlich versucht mit einer großzügigen Befüllung des Ballons die Platzhöhe zu verringern und die Steigrate zu erhöhen. Grund für diese Maßnahme war die Befürchtung, dass der Ballon aufgrund hoher Horizontalgeschwindigkeiten sehr weit fliegen könnte. So hat es ein anderes Ballonprojekt aus Oldenburg auch getan. Trotz erhöhter Befüllung mussten die Betreiber des Ballons bis kurz vor Berlin fahren, um diesen wieder einzusammeln (hätten sie nicht mehr Gas zur Befüllung benutzt, hätten sie bis nach Polen fahren müssen). Erst nach Platzen des Ballons ($t \approx 5500 \text{ s}$) verändert sich die Geschwindigkeit des Ballons deutlich. Da sich jetzt die Nutzlast im Fall befindet, ist die Geschwindigkeit negativ. Die Nutzlast wurde selbstverständlich von einem Fallschirm gebremst, welcher diese in Bodennähe auf eine Geschwindigkeit (im Betrag) von unter 10 km/h bremsen sollte. Da jedoch in einer Höhe von etwa 24 km (exakte Platzhöhe betrug $23,75 \text{ km}$) ein Luftdruck von etwa 30 hPa vorherrschen (tatsächlich gemessener Wert aus unserer Nutzlast), ist die Luftdichte (eine Berechnung der Luftdichte hergeleitet aus dem Luftdruck würde den Rahmen sprengen) entsprechend gering und die Bremswirkung des Fallschirms auch. Erst mit zunehmender Bodennähe, zunehmenden Luftdruck und Luftdichte nimmt die Bremswirkung des Fallschirms zu. Der Luftdruck nimmt mit zunehmender Höhe exponentiell ab. Damit lässt sich auch die exponentielle Abnahme (im Betrag nimmt die Geschwindigkeit ab) der Steiggeschwindigkeit erklären. Weitere Betrachtungen zu den Steiggeschwindigkeiten würde den Rahmen dieser Forschungsarbeit übersteigen.

7.2 Horizontalgeschwindigkeiten

Die Betrachtungen der Horizontalgeschwindigkeiten ist durchaus interessant, da in den verschiedenen Höhenschichten hohe Windgeschwindigkeiten herrschen können. Dies ist auch am folgenden Diagramm ersichtlich. Es zeigt die Horizontalgeschwindigkeit des Ballons in Abhängigkeit von der Höhe:



Auch hier wurden die Kurven mithilfe von 30 s-Intervallen geglättet. Auch wenn die Graphen schwanken, wird deutlich, dass die Geschwindigkeiten beim Auf- und Abstieg in den Höhenschichten ähnlich sind. Dies bedeutet, dass die Geschwindigkeit des Ballons, die von der in der Höhe herrschenden Windgeschwindigkeit abhängig ist, nicht von der Position des Ballons bezüglich des Längen- und Breitengrades, sondern vielmehr von der Höhe. Die höchste erreichte (gemittelte) Geschwindigkeit ($v=124,5$ km/h) liegt mit einer Höhe von 11,6 km im Bereich der wetterbildenden Schicht. Auch die Spitzengeschwindigkeit (also nicht gemittelt, sondern einmalig gemessen; $v=150,4$ km/h) liegt in einer Höhe von 12,0 km in diesem Bereich. Auch Jetstreams, dauerhaft wehende Luftströme, liegen in diesem Höhenbereich von 8 km bis 12 km. Daher ist es nur logisch, dass in diesen Höhen auch die Höchstgeschwindigkeiten erreicht werden. Auffällig ist jedoch auch, dass vor dem Erreichen (beim Aufstieg) und nach dem Verlassen (beim Abstieg) dieser Schicht, die Geschwindigkeit jeweils auf ein Minimum fällt. Aber auch das lässt sich leicht erklären. Die auf dem Erdboden wehenden Winde werden vorrangig durch Sonneneinstrahlung erzeugt. Diese erwärmt die verschiedenen Bereiche des Erdbodens unterschiedlich und die darüberstehende Luft dementsprechend auch. Die dadurch entstehenden Druckunterschiede sorgen für die bewegten Luftmassen, welche wir als Wind wahrnehmen.

8 Prüfung der Höhenformeln

Da wir für unseren ersten Start keine durchgehende Höhenmessung über GPS gewährleisten konnten, war es notwendig die Höhe des Ballons über den Luftdruck zu berechnen. Die Daten des Luftdrucks waren nämlich lückenlos. Mit Hilfe einer Formel lässt sich die Höhe in der Atmosphäre näherungsweise über den Luftdruck berechnen. Zurzeit existieren zwei Formeln, die auch beide wissenschaftlich anerkannt sind. Die einfache barometrische Höhenformel nutzt lediglich den Startluftdruckwert, den herrschenden Luftdruck in der jeweiligen Höhe und bedient sich einer größenlosen Konstante. Die komplexere internationale Höhenformel nutzt auch die Temperatur und den allgemein bekannten Temperaturgradienten. Das Problem für beide Formeln ist allerdings die Genauigkeit der Werte für geringen Luftdruck oberhalb von 10 km. Ab dieser Höhe divergieren die beiden Formeln in ihren Werten voneinander und von den wahren Werten (wird an nachfolgendes Diagramm ersichtlich). Daher war es für uns notwendig, eine eigene auf unsere Startsituation angepasste Formel zu entwickeln. Hilfreich war dabei die oben erwähnte der University of Wyoming. Die Daten sind jeweils konkret einer zuverlässigen Höhe mit gleichzeitiger Luftdruckmessung zugeordnet. Es war daher möglich, nach einer optimalen Formel zu forschen (genauere Ausführungen in der Jugendforscht-Arbeit unseres Vorgänger-Projektes). Mit Hilfe dieser eigenen Formel ließ sich der Höhenverlauf unseres Ballons zuverlässig und außerordentlich (Abweichung lag im genutzten Bereich bei durchschnittlich 1,08 %) genau berechnen. Im weiteren Verlauf unserer Betrachtungen zeigte sich, dass es die Genauigkeit erhöht, wenn man die barometrische Formel für den Verlauf der Höhe mit einem Luftdruck über 386 hPa mit einem Korrekturfaktor anpasst und für Höhenwerte mit einem Luftdruck unter 386 hPa die eigene Formel einsetzt. Die Formeln lauteten dann:

$$p \geq 386 \text{ hPa}: h(p) = -8000 * \ln\left(\frac{p}{p_{start}}\right) * (0,0001235 * p + 0,942)$$

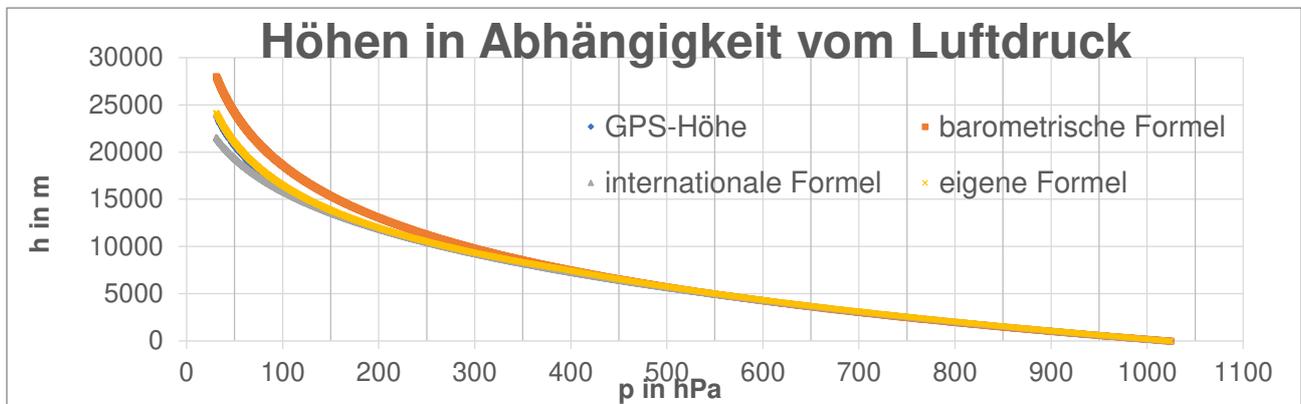
$$p \leq 386 \text{ hPa}: h(p) = (-6508,3) * \ln(p) + 46480$$

mit p : Luftdruck auf der gesuchten Höhe h und p_{start} : Luftdruck zum Startzeitpunkt

Um einen stetigen Übergang der beiden Formelteile zu ermitteln, wurden die Schnittstellen der Funktionen, welche bei 386 hPa liegt, berechnet.

Nun gilt es die Gültigkeit dieser Formeln wieder zu prüfen. Vor allem die deutlich veränderten Startwerte (erste Mission startete im Sommer, zweite Mission im Winter) können Einfluss auf die Genauigkeit der eigenen Formel haben. So zum Beispiel auch der vorherrschende Luftdruck des Starttages. Der Startluftdruck betrug für den ersten Start 1021,94 hPa und für den zweiten Start 1024,70 hPa. Diese Veränderung begründet eine verminderte Genauigkeit unserer Formel, da diese auf den Luftdruck des ersten Starts geeicht ist. Währenddessen nutzen die barometrische und die internationale Höhenformel den Startluftdruck des zweiten Starts. Im folgenden Diagramm sind die Werte der GPS-Höhe der letzten Mission, über die barometrische, internationale und eigene Formel in Abhängigkeit vom Luftdruck aufgetragen:

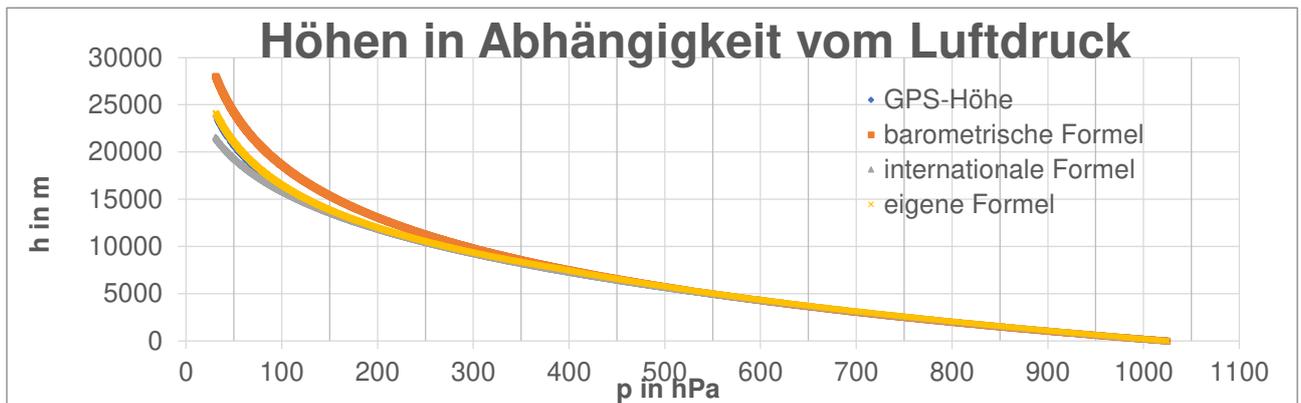
5



Hier wird deutlich, dass die Formeln für Werte unterhalb von 10.000 m bzw. von 250 hPa gültig sind. Erst ab einer Höhe von 10.000 m beginnen sie zu divergieren.

10

Das nachfolgende Diagramm zeigt dieselben Werte ab einem Luftdruck von 250 hPa:



Hier sieht man deutlich, wie stark die einzelnen Werte auseinanderliegen. So liegen die Werte der barometrischen und der internationalen Formel mehrere Kilometer auseinander. Lediglich die Werte unserer eigenen Formel können die Werte der echten Höhe noch ansatzweise genau berechnen. So liegt die mittlere Abweichung der eigenen Formel bei 2,15 %. Zum Vergleich: Die internationale Formel hat eine mittlere Abweichung von 2,21 % und die barometrische Formel eine mittlere Abweichung von 9,53 s. Obwohl unsere Formel eigens für einen bestimmten Starttag mit einem spezifischen Luftdruck auf Meereshöhe erstellt worden ist, liefert sie unter anderen Startumständen im Mittel immer noch genauere Werte als die Literatur-Formeln. Würde der Startluftdruck für unsere Formel dem Luftdruck des zweiten Starttages angepasst werden, so würde sich Genauigkeit unserer Formel erhöhen.

15

20

9 Reflexion

Im Prozess des Lernens und auch in der Forschung ist es zufriedenstellender, wenn etwas Geplantes direkt funktioniert. Doch keine Planung kann perfekt sein und besonders, wenn das Projekt an Komplexität und Zielen gewinnt, gewinnt es auch an potentiellen Problemen. So auch bei diesem doch noch relativ kleinen Ballon-Projekt. Im folgendem wird sowohl der erste missglückte als auch der zweite partiell missglückte Ballonstart kritisch betrachtet und versucht die entscheidenden Fehler herauszuarbeiten.

9.1 Der erste Start

Der erste Start missglückte, als die Schnur direkt unterhalb der Schlaufe am Ballon riss. Es ist auszuschließen, dass die Schnur durch einen Kabelbinder oder sogar einer der Kabelbinder selbst riss, da weder eine offene Schlaufe noch einen offenen Kabelbinder/intakte Schlaufe gefunden wurde. Die gerissene Schnur muss demnach also entweder durch Materialermüdung oder durch eine Überlastung gerissen sein. Selbstverständlich haben wir die Belastbarkeit der Schnur vor dem Start in Erwägung gezogen und getestet. Doch ein Vergleich der gerissenen Schnur mit der intakten, neuen Schnur (die benutzte Schnur war noch von der Schnurrolle des ersten Ballonstart) zeigte, dass die Schnur erheblich an Materialdicke verloren hatte. Diese Materialermüdung im Zusammenhang mit der Kälte überstieg die Belastbarkeit. Außerdem wirkte der Ballon als eine Art Segel. Diese Wirkung belastete die Schnur noch mehr. An diesem Höhepunkt der Kraftwirkung auf die Schnur riss diese. Die auf die Schnur wirkenden Kräfte erreichten ihren Höhepunkt allerdings nur in der Startphase, da zu diesem Zeitpunkt die wirkenden Kräfte nicht in Geschwindigkeit umgewandelt werden konnten, da das Ballongespann noch am Boden gehalten wurde.

9.2 Der zweite Start

Der zweite Start erfolgte etwa zwei Stunden nach unserem ersten, missglückten Startversuch. Hier benutzten wir mehrere stärkere Schnüre, um dem Wind entgegen zu wirken. Wir ließen den Ballon nun wieder langsam an seiner Schnur hoch, um einen sogenannten „Jump-Start“ zu vermeiden. Hierbei wurde der Ballon allerdings wieder zur Seite gezogen und das Gespann wurde zu einem sehr großen Pendel. Der Aufstieg des Ballons und die Strecke zur angehängten Ortungs-Nutzlast des DLR verhinderte allerdings einen starken Aufprall unserer Box, welche sich schon einige Meter über dem Boden befand. Allerdings verding sich einer der Starthelfer in einer Schnur und unsere Nutzlast wurde einer Erschütterung ausgesetzt. Hierdurch lösten sich von beiden Geiger-Müller Zählrohren jeweils ein Kabel und einige Kameras verrutschten. Die benutzten Steckverbindungen waren nicht auf eine Erschütterung dieser Art ausgelegt, ähnlich wie das doppelseitige Klebeband oder der Formschluss welche zum Halten der Kameras vorgesehen waren. Zudem verlor das Klebeband bei der Kälte erheblich von seiner klebenden Wirkung. Aber schon vor dem Start hatten wir Probleme mit dem Zusammenbauen der Nutzlast, da sich bei der Winter-Kälte und dem Wind das Verbinden aller Kabel vor Ort als schwierig erwies. Die verschiedenen Ebenen des Aufbaus konnten wir erst kurz vor dem Start finalisieren, da alle Kameras und Datenlogger direkt vor dem Start angeschaltet werden konnten. Hierbei wurde mithilfe des 4-Augen-Prinzips und einer Kontroll-Liste beachtet kein Kabel zu vergessen. Platzierung und Anordnung unserer Ausrüstung funktionierte zwar, war aber schwierig planmäßig umzusetzen. Anhand besserer Verankerungen von Kabeln und Kameras hätte die Mission trotz mittelmäßigem Start eventuell noch erfolgreich sein können.

9.3 Fazit

Der starke Wind, Kälte und Materialermüdung sorgten dafür, dass die Schnur überlastet war und riss.

Außerdem war die Box einer nicht erwarteten Erschütterung ausgesetzt. Hierbei lösten sich wichtige Steckverbindungen und Kameras.

- 5 Die Platzierung unserer Versuchsinstrumente und Kameras beziehungsweise deren Stromquellen erwies sich ebenfalls als schwierig, besonders durch die Wetterbedingungen am Starttag. Bessere Verbindungen und Verankerungen würden einen abrupten Start kompensieren können.

Hauptsächliche Probleme (wie auch aus der Fehleranalyse zu entnehmen):

- reißende Schnur
- 10 • unkontrollierter Start
 - Fehler in der Durchführung
- lockere Verbindungen
- lockere Platzierungen

9.4 Lösungsideen

- 15 Für unsere Probleme haben wir zwei Lösungsansätze, die viele Schwierigkeiten beseitigen sollten.

9.4.1 Start

Um die Schnur zwischen Ballon und Nutzlast zu entlasten und um der horizontalen Bewegung des Ballons in der Startphase entgegen zu wirken, kam uns die Idee einer Startvorrichtung. Diese würde uns eine größere Kontrolle über den Start verschaffen und gleichzeitig die Verbindungs-Schnur entlasten. Hierdurch wären

20 Starts bei Wetterbedingungen solch schlechten Bedingungen besser möglich.

Hierfür würden wir eine oder mehrere Schnüre mit einer ausreichend hohen Bruchlast (z.B. Dyneema) an der Befestigungs-Schleife des Ballons mithilfe eines Knoten befestigen, welchen wir mit einer separaten „Löse-Schnur“ öffnen könnten (z.B. einen „Anbindeknoten“). Durch diese Schnur wäre es beim Start möglich die Geschwindigkeit des Startes anzupassen. Hierzu würde sich ein Team unterhalb des Ballons für ein

25 reibungsloses Anhängen der Nutzlast kümmern, während von einem zweiten, verschiebbaren Punkt der Ballon am Boden gehalten wird. Bei starken Böen bietet es sich an, mehrere Ankerpunkte zu benutzen. Die Schnüre der Halteschnüre sollten allerdings durch denselben Anbindeknoten am Ballon befestigt werden, um die Synchronisation zu gewährleisten. So kann durch Koordination die Leine zwischen Ballon und Nutzlast kontrolliert auf Spannung gebracht werden, bis der Start auf Kommando durchgeführt wird.

- 30 Ein solcher Start würde theoretisch ohne Erschütterung verlaufen, da durch die Kontrolle alle Beteiligten genug Zeit hätten, zurückzutreten und die Nutzlast nicht schwingen würde.

9.4.2 Verbindungen/Platzierungen

Die Zusammensetzung unserer Nutzlast war schon weit im Vorlauf geplant und die Innenseite der Box wurde mithilfe von Vorrichtung für den Start vorbereitet. Allerdings waren alle Verbindungen und Befestigungen im

35 ruhigem „Schreibtisch-Umfeld“ getestet worden. Hierbei ließen wir äußere Einflüsse wie eine Erschütterung außer Acht und verließen uns auf doppelseitiges Klebeband, Heißkleber und Steckverbindungen. Allerdings ist eine Alternative schwierig zu finden, da wir unsere Elektronik erst kurz vor dem Start anschalten konnten, um Strom für die Flugzeit zu sparen. Im Falle der SenseBox und des Geiger-Boards erwies sich unsere Lösung des selbstgebautes USB-Kabel als extrem praktikabel, unsere Kameras allerdings konnten wir auf solche

40 Weise nicht „fernsteuern“. Um den Kameras Stabilität zu geben, platzierten wir alle drei Kameras am Boden

der Box. Dies hatte zur Folge, dass wir alles in anderen darüberliegenden Schichten erst nach den Kameras aufbauen konnten.

Unsere Lösungsidee ist ein herausnehmbares Gerüst, in welchem alle Gerätschaften platziert, arretiert und gestartet werden könnten. Diesen Zusammenschluss würde dann als Ganzes in unsere Nutzlast
5 niedergelassen, und durch Formschluss und Kleber an Ort und Stelle gehalten werden.

10 Quellen

Letzter Aufruf: 11. Januar 2019 um 13:15 Uhr

https://www.ezag.com/fileadmin/ezag/user-uploads/isotopes/isotopes/Isotrak/isotrak-pdf/Decay_Schema_Data/Ra-226.pdf

5 https://www.physnet.uni-hamburg.de/TUHH/Versuchsanleitung/Gamma_Absorption.pdf

https://www.onmeda.de/strahlenmedizin/ionisierende_strahlung_reichweite-halbwertschichtdicke,-zehntelwertschichtdicke-2413-7.html

Letzter Aufruf: 05. Januar 2019 um 14:20 Uhr

http://www.energiewelten.de/elexikon/lexikon/seiten/htm/020630_Abschirmung_von_Strahlung.htm

10 <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/wechselwirkung-von-gammastrahlung-mit-materie/15467>

<https://www.spektrum.de/lexikon/physik/photoeffekt/11182>

<https://www.spektrum.de/lexikon/physik/compton-effekt/2524>

<http://www.ncurproceedings.org/ojs/index.php/NCUR2014/article/download/1173/659>

Letzter Aufruf am 03. Januar um 20:50 Uhr

15 <https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Jetstream>

Letzter Aufruf am 23.02.2019 um 12:15 Uhr

<https://www.spektrum.de/lexikon/physik/paarbildung/10835>

<https://www.hist-geo-space-sci.net/5/175/2014/hgss-5-175-2014.pdf>

Letzter Aufruf am 23.02.2019 um 18:40 Uhr

20 <https://www.bfs.de/DE/themen/ion/wirkung/einfuehrung/einfuehrung.html>

https://www.teilchenwelt.de/fileadmin/user_upload/Redaktion/Netzwerk_Teilchenwelt/Material_Lehrkraefte/Unterricht_TP_Kosmische-Strahlung_red.pdf

<https://www.spektrum.de/lexikon/physik/kosmische-strahlung/8412>

25 Schriftliche Quellen

„Eine Forschungsmission in der Stratosphäre“ (schriftliche Arbeit unserer Gruppe im Bereich Geo- und Raumwissenschaften im Landeswettbewerb Niedersachsen 2018)