Tobias Schüttler (tobias.schuettler@lmu.de)

Nicola Schneider

Nina Schmid

Lisa Nagel

Lehrstuhl für Didaktik der Physik

Ludwig-Maximilians-Universität München

07.09.2017

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

DLR

High Altitude Balloon – Missionsüberblick

Technik des Ballons

1. Hochelastischer Wetterballon: Gefüllt mit Helium, platzt in ca. 30 km Höhe
2. GPS-GSM-Tracker inkl. SIM-Karte zum Wiederfinden der Sonde
3. Rundkappenfallschirm mit geeignetem Durchmesser
4. Gesamtmasse (inkl. Nutzlast!) darf höchstens 4 kg sein

Rechtliches

1. Genehmigung des Luftamts
2. Luftfahrt-Haftpflichtversicherung
3. ggf. Genehmigung eines naheliegenden Flughafens
4. Erlaubnis des Startgelände-eigentümers

Flugvorhersage

1. Ist der Start freigegeben? Voraussetzungen: Mind. 5 km horizontale Sichtweite, maximaler Bewölkungsgrad 4/8
2. Flugroute: Vorhersage über http://predict.habhub.org, ggf. anpassen durch Variation der Ballongröße
3. Achtung: kein Überqueren ausländischen Luftraums!

Nutzlast

- Ortungssysteme
- Kamerasysteme
- Mikrokontrollerboards mit unterschiedlichen Sensoren (Atmosphären-parameter, Strahlungs-arten etc.)

nach ca. 3h

Inhalt

High Altitude Balloon – Missionsüberblick 1

Einleitung 4

1. Stratosphärenballonmissionen – „near space“ für Jedermann 5

1.1. Zum Einstieg eine günstige „Do it yourself Mission“ 6

1.1.1. Startvorbereitungen 11

1.1.2. Start des Ballons 12

1.1.3. Bergung 15

1.2. Die Technik des „High Altitude Ballooning“ 15

1.2.1. Wetterballons 16

1.2.2. Fallschirme 16

1.2.3. Sonde 18

1.2.4. Die „wissenschaftliche“ Nutzlast 19

1.2.4.1. Bilder der Erde und des Weltalls 19

1.2.4.2. Fernerkundung von Vegetation 20

1.2.4.3. Messung von atmosphärischen Parametern 20

2. Einsatzgebiete von Stratosphärenballons in der Wissenschaft 22

2.1. Außergewöhnliche, wissenschaftliche Projekte mit Stratosphärenballons 22

2.1.1. Autonomes Fliegen in der Stratosphäre 22

2.1.2. Fernerkundung zu Ausbildungszwecken 23

2.1.3. Das Sunrise Teleskop 25

2.2. Radiosonden 27

3. Physikalische Grundlagen 30

3.1. Die Atmosphäre der Erde 30

3.1.1. Zusammensetzung der Erdatmosphäre 32

3.1.2. Aufbau der Atmosphäre 32

3.1.3. Temperaturverlauf der Atmosphäre 34

3.1.4. Internationale Standardatmosphäre (ISA) 36

3.2. Die Physik des Stratosphärenballons 38

Anhang

I. Die barometrische Höhenformel 44

I.1. Konstante Temperatur 44

I.2. Veränderliche Temperatur 45

II. Rechtliche Grundlagen für HAB-Missionen 45

III. Checklisten für Stratosphärenballon-Missionen 49

IV. Bezugsquellen und hilfreiche Links 51

V. Quellen 52

Abbildungsverzeichnis 55

Abkürzungsverzeichnis 56

Einleitung

Die Durchführung von Ballonexperimenten mit sogenannten Stratosphärenballons in großen Höhen von über 30 km erlebt derzeit einen kleinen Boom. Ausgerüstet sind die mitgeführten Sonden meist mit Digitalkameras, welche den Aufstieg filmen, und mit einem sogenannten GPS-GSM-Tracker. Dieser bestimmt die Position der Sonde (GPS) und übermittelt diese dann per Mobilfunk (GSM) an die Bergungscrew. Mit ein wenig Glück kann die Sonde mit Hilfe dieser Informationen nach ihrem Abstieg an einem Fallschirm unbeschadet geborgen werden. Die auf diese Weise entstandenen Aufnahmen von der Erde sind sowohl in ihrer Ästhetik als auch durch ihren Informationsgehalt beeindruckend. Sie stellen eine zwar deutlich vereinfachte, aber doch in vielen Punkten vergleichbare Analogie zu Satellitenbildern dar. Zudem bilden die Stratosphärenballonexperimente eine gute Möglichkeit, um die Technologie von „echten“, sehr kostenintensiven Satellitenmissionen, auf faszinierende Art und Weise zu vermitteln.

Der vorliegende Leitfaden gibt in Kapitel 1 einen Überblick über Stratosphärenballon-missionen und die eingesetzte Technik. Anschließend wird im zweiten Kapitel auf wissenschaftliche Anwendungen von „High Altitude Balloon“ Missionen eingegangen. In Kapitel 3 wird der Aufbau der Erdatmosphäre ausführlicher betrachtet und die Physik der Ballonaufstiege erklärt. Im Anhang finden sich Erläuterungen zum rechtlichen Rahmen, in welchem sich solche Ballonmissionen bewegen. Darauf folgt eine Checkliste, welche eine Hilfestellung für den reibungslosen Ablauf einer Ballonmission bietet. Zum Abschluss werden Hinweise zu Bezugsquellen für Materialien und hilfreichen Links angegeben.

1. Stratosphärenballonmissionen – „near space“ für Jedermann

Ein Stratosphärenballon ist ein mit Helium, Wasserstoff oder Ballongas gefüllter, großer Ballon aus hochelastischem Naturkautschuk. Abhängig von der Größe können unterschiedlich schwere Nutzlasten in Höhen von über 30 Kilometer gebracht werden. Bekannteste Vertreter sind die von Wetterdiensten gestarteten Wetterballons, mit deren Hilfe sogenannte Vertikalprofile, also höhenabhängige atmosphärische Messungen, erstellt werden. Aber auch so spektakuläre Missionen wie Felix Baumgartners Extremfallschirmsprung im Jahre 2012 werden mit Hilfe von Stratosphärenballons durchgeführt.

Im Folgenden wird zunächst als Einstieg eine einfache und vergleichsweise kostengünstige Stratosphärenmission vorgestellt, anschließend wird auf die verschiedenen Ballonsysteme sowie Fallschirme und mögliche Sonden eingegangen. Ziel dieses Kapitels ist es, den Leser in die Lage zu versetzen, eine eigene Stratosphärenballonmission sicher und erfolgreich durchführen zu können.

<u>Achtung:</u> Ein Ballonaufstieg in derartige Höhen stellt immer auch in gewissem Sinne eine Expedition ins Ungewisse dar! Es wird daher dringend empfohlen, vor dem Einsatz von komplexer und teurer Technik, erst einmal Erfahrungen mit kleineren Missionen zu sammeln. Denn ganz gleich wie gut ein solcher Ballonaufstieg geplant wird, ist der Verlust der Sonde dennoch nie ganz auszuschließen, was ein Mindestmaß an pragmatischem Forschergeist unabdingbar macht.

1.1. Zum Einstieg eine günstige „Do it yourself Mission“

Um nicht gleich finanziell Kopf und Kragen zu riskieren, empfiehlt es sich, die erste eigene Stratosphärenballon - oder „High Altitude Balloon“ (HAB) - Mission möglichst einfach und kostengünstig zu gestalten. Die folgenden Ausführungen sind als eine Art Kurzanleitung zu verstehen, bei welcher auf tiefergehende Hintergrundinformationen weitgehend verzichtet wird und der Schwerpunkt auf der praktischen Durchführung einer ersten Mission liegt. Hierfür benötigt man nur wenige Komponenten, wodurch die Kosten geringgehalten werden können. Je nach Ausführung der Komponenten, beispielsweise der verwendeten Kamera, sind jedoch Abweichungen möglich. Was also wird benötigt?

- **Hochelastischer Ballon der 300-400-Gramm Klasse (ca. 40 €)**

  Solche Ballons werden unter anderem vom Deutschen Wetterdienst für Radiosondenaufstiege zu atmosphärischen Messungen eingesetzt. Sie bestehen aus Naturkautschukmaterial, welches sich beim Aufsteigen auf Grund des Luftdruckabfalls ausdehnt. Die Ballonhülle kann dabei beachtliche Größen von über zehn Meter Durchmesser annehmen, was bei guten Sichtbedingungen eine Beobachtung des Ballons bis zum Platzen ermöglicht.
- **Rundkappenfallschirm, Durchmesser mindestens 0,5 Meter (ab ca. 10 €)**

  Als Material wird hier meist ein Nylontuch verwendet. Ein Fallschirm kann den eigenen Bedürfnissen entsprechend selbst zusammengenäht werden. Fertig vernähte erhält man jedoch auch zu vernünftigen Preisen als Modellraketenzubehör.
- Verbindungsschnur mit Bruchlast unter 230 N (wenige €)

  Auf Grund rechtlicher Vorgaben ist zwingend darauf zu achten, dass die nominelle Bruchlast der Schnur zwischen Ballon und Fallschirm bzw. Fallschirm und Sonde 230 N nicht übersteigt.
- **Sonde**: Beispielsweise eine zweiteilige Styroporkugel mit einem Durchmesser von 30 Zentimetern (ca. 5 €). Selbstverständlich kann die Sonde auch aus Styroporplatten oder anderem Material selbst zusammengeklebt werden. Hierfür ist der Aufwand etwas höher.
- **Minikamera bis 50 Gramm (ca. 40 €)**

  Sogenannte „Action Cams“ sind mittlerweile sehr beliebt und weit verbreitet. Sie sind leicht, einfach zu bedienen und liefern zum Teil verblüffend gute Aufnahmen.

Wenn es nicht gleich eine hochwertige Kamera (Go Pro o.ä.) sein muss, findet man sehr kostengünstige Geräte bei Ebay.

- **GPS-GSM-Tracker ca. 50 Gramm (ab ca. 40 €)**

  Die Funktionsweise dieser elektronischen Minispürhunde ist sehr einfach: Über GPS ermitteln die Geräte ihre Position und senden diese über das Mobilfunknetz bei Bedarf an den Nutzer. Die einfache Steuerung der Geräte erfolgt ebenfalls meist über Kurznachrichten (SMS) oder vom PC aus. Für den Betrieb ist eine SIM-Karte sowie Mobilfunkempfang erforderlich.

- **Powerbank-Akku ab 2000 mAh (ca. 10 €)**

  Lithium-Ionen Akkus sind kostengünstig und haben eine hohe Energiedichte. Die Ladung erfolgt in den meisten Fällen über ein bereits integriertes Ladegerät via USB. Der Nachteil dieser Akkutypen ist die hohe Temperaturabhängigkeit ihrer Kapazität. Viele Hersteller geben eine Betriebstemperatur von mindesten 0°C an. Die Akkus funktionieren in gewissen Grenzen auch noch bei niedrigeren Temperaturen, jedoch mit zum Teil deutlich geringerer Kapazität. Die Verwendung eines Wärmepads kann dieses Problem lösen.

- **Wärmepad**

  Diese kleinen Latentwärmespeicher erhält man oft als Werbegeschenk für die kalte Jahreszeit. Eine Flüssigkeit aus Natriumacetat-Trihydrat dient als Wärmeenergie Speicher, welcher die Wärme bei Kristallisation wieder abgibt. Da die Styroporhülle der Sonde gut isoliert, ist normalerweise ein kleines Wärmepad von etwa 100 Gramm ausreichend.

- **Mini USB y-Kabel (ca. 5 €)**

  Um den Akku mit dem GPS-GSM-Tracker und der Kamera zu verbinden, wird ein Y-Kabel verwendet. Wer ganz sicher gehen möchte verwendet zwei Akkus, um für den GPS-Tracker mehr Redundanz zu erzielen.

- **Kleinmaterial** (Gaffa-Tape, Kabelbinder, Styropor verträglicher Klebstoff etc.)

  Nicht nur Bühnentechniker wissen: Um Dinge aller Art zu verbinden, verwendet man Gaffa und Kabelbinder. Auch auf der internationalen Raumstation ISS verwenden die Astronauten diese Materialien für alle nur denkbaren Zwecke.

- **Helium oder Ballongas**

  Prinzipiell kann man zur Befüllung des Ballons auch preisgünstigeren Wasserstoff

verwenden. Da dieser jedoch brennbar ist, wird hier dringend davon abgeraten. Stattdessen wird die Beschaffung einer größeren Heliumflasche (200-300 bar) empfohlen, da kleinere Gebinde in der Regel deutlich teurer kommen.

Alle benötigten Materialien findet man bei entsprechenden Anbietern im Internet einzeln oder beispielsweise bei www.stratoflights.com als Komplettlösung. Eine denkbare Zusammenstellung mit entsprechenden Bezugsquellen zeigt die folgende Tabelle.

Tabelle 1: Bezugsquellen für Stratosphärenballon-Komponenten.

Komponente	Beispiel	Bezugsquelle	Abbildung
Ballon	KKS Cosmoprene Radiosondenballon	http://www.meteorologyshop.eu	
Fallschirm	Fallschirm 55 cm	https://www.stratoflights.com	
Sonde	Z.B. Styroporkugeln, Durchmesser 30 cm	www.amazon.de	
Kamera	Keychain „808 #16“ oder „Mate808“	www.ebay.de Infos unter: http://www.chucklohr.com/	
GPS-Tracker	GPS Tracker TK102	www.ebay.de	
Powerbank	LogiLink PA0064	www.conrad.de	
Helium		Linde Gas	

Der Aufbau des Gespanns ist in Abbildung 1 abgebildet. Um die Bergungschancen bei einer eventuellen Baumlandung zu erhöhen, empfiehlt es sich, eine mindestens 10 Meter lange Verbindungsschnur zwischen Fallschirm und Sonde zu verwenden. Die Gesamtlänge des Gespanns darf aber 60 Meter nicht übersteigen. Um schöne Bilder der Erde zu erhalten, sollte die Kamera direkt nach unten – also „nadir“ – gerichtet sein. Das Akkufach des GPS-Trackers sollte unbedingt noch mit zwei Lagen Tesafilm gesichert werden, um ein Abspringen desselben bei einer harten Landung zu vermeiden. Wer ganz sichergehen möchte, packt den GPS-Tracker zudem noch in eine extra Lage Styropor ein.

Achtung: Eine zuverlässige Funktion des GPS-Trackers ist für das Wiederfinden der Sonde zwingende Voraussetzung! Lage der Antenne beachten!

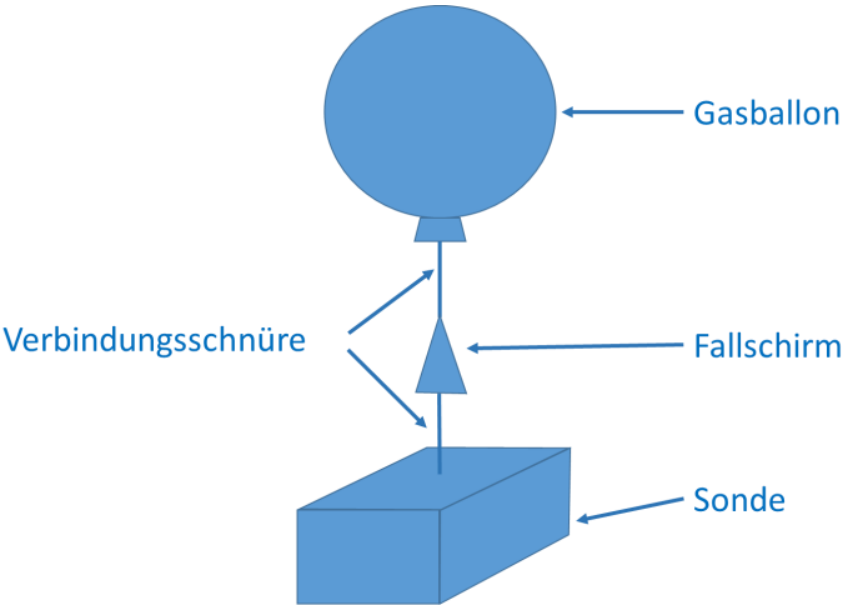


Abbildung 1: Schematische Skizze des Ballongespanns.

Der eingesetzte GPS-Tracker muss vor dem Sondenaufstieg unbedingt ausgiebig getestet werden! Insbesondere ist eine eventuell notwendige Freischaltung der eingesetzten Sim-Karte zu beachten. Wenn ein Verlassen des deutschen Luftraums auf Grund entsprechender Luftströmungen nicht ausgeschlossen werden kann, muss ein einwandfreier Betrieb im Ausland (Roaming!) sichergestellt sein.

Achtung: Das Überfliegen ausländischen Luftraums erfordert in der Regel eine besondere Genehmigung[1]! Falls eine solche nicht vorliegt und das Eindringen in diesen Luftraum nicht auszuschließen ist, wird dringend von einem Ballonstart abgeraten, da andernfalls kein Versicherungsschutz besteht und unter Umständen juristische Folgen nicht auszuschließen sind!

Vor dem Start ist die Sonde aus den beschriebenen Einzelteilen zusammenzusetzen. Dazu wird eine Halbkugelschale als Unter-, die andere als Oberseite festgelegt. Das Styropor lässt sich gut mit einem Cuttermesser oder einem spitzen, kleinen Schraubendreher bearbeiten. Achtung: Es gibt Klebstoffe, die Styropor nicht kleben sondern zersetzen. Gut geeignet sind hingegen wasserlösliche Holzleime (z.B. „Ponal“) oder Spezialklebstoffe. In die Unterseite schneidet man ein passendes Loch für die Kamera, sodass das Objektiv möglichst exakt hindurch passt. Die Kamera kann dann mit etwas Silikon fixiert werden. GPS-Tracker und Powerbank finden in der Kugeloberseite Platz und werden dort beispielsweise mit Kabelbindern fixiert. Auf diese Weise ist sichergestellt, dass sich der Schwerpunkt der Sonde auf der wasserdicht verschlossenen (!) Kugeloberseite befindet, sodass bei einer eventuellen Wasserlandung keine Feuchtigkeit in die Sonde eindringen kann.

Zur Befestigung des Fallschirms hat es sich bewährt, die Halteschnur durch ein dünnes Loch in der Kugeloberseite zu führen, welches später mit etwas Silikon o.ä. verschlossen wird. Zur gleichmäßigen Krafteinleitung wird die Schnur im Kugelinneren mit einem kreisrunden Sperrholzplättchen (Mindestdurchmesser 5 cm – besser größer) oder einem Kreuz aus Kiefervierkantleisten verbunden. Das Holz ist so anzuordnen, dass die Haltekräfte möglichst gleichmäßig auf die Styroporhalbschale verteilt werden. Zum Verschließen der Styroporkugel, kurz vor dem Start, eignet sich Klebeband (Gaffa-Tape).

Die eigentliche HAB-Mission erfolgt in drei Schritten:

1. Anmeldung und Einholen der Starterlaubnis beim jeweiligen Luftamt bzw. bei der deutschen Flugsicherung (DFS).
2. Start zum genehmigten Zeitpunkt am freigegebenen Startplatz.
3. Bergung der Sonde nach Empfang der GPS-Daten des Landepunktes.

[1] Eine Ausnahmeregelung existiert nur für Ballons der Klasse „leicht“, welche ausschließlich für meteorologische Zwecke verwendet werden.

Da jede der drei Phasen ihre eigenen Herausforderungen mit sich bringt, werden sie im Folgenden kurz beschrieben.

1.1.1. Startvorbereitungen

Der Aufstieg eines Ballons mit einer Gesamtmasse von höchstens 4 Kilogramm (Freiballon Klasse leicht) ist in der EU durch den jeweiligen Staat genehmigungspflichtig. Als Rechtsgrundlage dient die „DURCHFÜHRUNGSVER-ORDNUNG (EU) Nr. 923/2012“, Unterpunkt „SERA.3140 Unbemannte Freiballone“, Anlage 2 der europäischen Kommission.

Die Genehmigung erteilt das Luftamt des jeweiligen Bundeslandes oder, falls der Ballonaufstieg in Flughafennähe erfolgen soll, die DFS. Die jeweiligen Ansprechpartner, welche via Email kontaktiert werden müssen, findet man im Internet. Die Genehmigung kostet eine Bearbeitungsgebühr von derzeit 40 € und muss spätestens zwei Wochen vor dem anvisierten Starttermin beantragt werden.

Der Ballonaufstieg muss durch eine spezielle Haftpflichtversicherung versichert sein. Im Normalfall genügt eine Privathaftpflichtversicherung hierzu **nicht**! Die Kosten für eine solche eintägige Versicherung belaufen sich auf etwa 50 Euro, man erhält sie bei jedem besseren Versicherungsmakler.

Die Details der rechtlichen Grundlagen werden im Anhang gesondert behandelt, weshalb hier nur die wichtigsten Punkte genannt werden. Im Grunde lässt sich die Kernaussage der Gesetzestexte zusammenfassen zu:

„Ein unbemannter Freiballon darf nur dann betrieben werden, wenn beim Auftreffen des Ballons oder eines Teils davon, einschließlich der Nutzlast, auf die Erdoberfläche Personen oder Sachen nicht gefährdet werden.“ (Europäische Kommission, 2012, Anlage 2, Absatz 2.2.5).

Um dieses Ziel zu erreichen, ist die Verwendung eines Fallschirms vorgeschrieben. Zudem empfiehlt es sich, die Materialauswahl der Sonde so auszulegen, dass sie auch bei einem nicht völlig auszuschließenden Abstieg ohne Fallschirm keinen größeren Schaden anrichten kann. Eine Sonde aus Styropor oder ähnlichem bietet den großen Vorteil, bei einem harten Aufprall Energie zu absorbieren. Darüber hinaus ist das Material günstig und recht einfach zu

bearbeiten. Außerdem bietet es eine gute Isolierung gegen Temperaturschwankungen. Die hier vorgestellte Variante einer Styroporkugelschale ist besonders einfach zu realisieren.

Die Styroporhülle der Sonde sollte eher größer ausgelegt werden. Dies vereinfacht den Einbau der technischen Komponenten und führt zudem zu einem höheren Luftwiderstand im Falle eines Versagens des Fallschirms. In jedem Fall muss gewährleistet sein, dass die Flächendichte (Gesamtmasse der Nutzlast geteilt durch deren kleinste Oberfläche) höchstens 13 Gramm pro Quadratzentimeter beträgt. Sind alle Vorschriften eingehalten, eine Versicherung abgeschlossen und der Flug beim Luftamt bzw. bei der DFS angemeldet, steht einem Start nichts mehr im Wege.

1.1.2. Start des Ballons

Vor dem Start sollte der voraussichtliche Flugpfad mit einem Onlinetool (http://predict.habhub.org/), welches an der Universität Cambridge entwickelt wurde, vorhergesagt werden. Die Simulation nutzt Wetterdaten der amerikanischen NOAA und liefert eine gute Vorhersage. Deren Genauigkeit hängt, neben der vom Nutzer nicht zu beeinflussenden Güte der Wettervorhersage, auch davon ab, wie exakt die Auf- und Abstiegsgeschwindigkeit des Ballons bekannt sind. Da dieser Punkt physikalisch sehr interessant ist, wird er in 3.2 ausführlich behandelt. Für die hier beschriebene, erste Mission kann man für Auf- und Abstieg mit 5 m/s rechnen.

Die Wetterentwicklung sollte bereits einige Tage vor dem Start verfolgt werden. Dadurch kann die Qualität der Vorhersage des Flugs besser beurteilt und rechtzeitig entschieden werden, ob ein Ballonstart überhaupt möglich ist. Es gibt Wetterbedingungen, bei denen ein Ballonstart nur sehr schwer realisierbar ist – insbesondere bei starkem Wind. Außerdem dürfen Freiballons nur bei einer horizontalen Sicht von mindestens 5 km und einer Wolkenbedeckung von höchstens 4 Achtel gestartet werden. Die entsprechenden Informationen erhält man beispielsweise bei https://www.meteoblue.com/ (Schweizer Wetterdienst).

Am Starttag sollte man insbesondere für die erste Mission etwa zwei Stunden Vorbereitungszeit einplanen. Neben dem Ballongespann, bestehend aus Sonde, Verbindungsschnur, Fallschirm und Ballon, benötigt man noch Helium oder Ballongas, einige größere Kabelbinder und Gaffa-Tape, sowie eine Grundausrüstung an Werkzeug (Schere, Schraubendreher etc.). Stoff- oder Latexhandschuhe zum Umgang mit dem Ballon und eine

große, saubere Decke auf welcher der Ballon ausgebreitet werden kann, kommen ebenfalls ins Gepäck.

Mit der Heliummenge kann man die Aufstiegsgeschwindigkeit und die maximale Steighöhe in gewissen Grenzen variieren. Die Steigrate muss jedoch bei etwa 5 m/s liegen. Abweichende Steigraten müssen mit dem zuständigen Luftamt vereinbart werden. Für eine leichte Mission mit einer Gesamtmasse unter einem Kilogramm, werden etwa 1,2 m^3 Helium bei Atmosphärendruck (ca. 1 bar) benötigt. Der Umgang mit den unter hohem Druck stehenden Gasflaschen muss in aller Sorgfalt geschehen – insbesondere ist beim Transport unbedingt darauf zu achten, dass die Sicherungskappe fest mit der Gasflasche verschraubt ist. Um die Heliummenge zu kontrollieren gibt es mehrere Möglichkeiten:

1) Messung des Abfalls des Flaschendrucks bei bekanntem Flaschenvolumen
2) Abschätzen des Ballonumfangs mit einer Schnur
3) Messen der Auftriebskraft mit einem geeigneten Wägestück

Zu 1) In der Praxis hat es sich besonders bewährt, die ungefähre Füllmenge über den Flaschendruck der Heliumflasche abzuschätzen. Hierzu ist jedoch ein Druckminderer mit Manometer erforderlich. Nach dem Gesetz von *Boyle-Mariotte* ist das Produkt aus Druck und Volumen eines idealen Gases konstant. Wenn man also einer Heliumflasche mit 50 Litern Inhalt und 200 bar Innendruck für einen Heliumballon 1,2 m^3 Helium bei Atmosphärendruck (ca. 1 bar) entnehmen möchte, führt dies zu einer Druckminderung in der Heliumflasche um etwa $1{,}2m^3 : 50l \cdot 1bar = 24bar$.

Zu 2) Wenn kein Druckminderer mit Manometer vorhanden ist, kann man alternativ auch vereinfachend den Ballon als kugelförmig ansehen und dessen Radius *r* abschätzen. Im Beispiel wäre das $r = \sqrt[3]{1{,}2m^3 : (\frac{4}{3}\pi)} \approx 0{,}7m$. Der Ballon müsste nun also einen Durchmesser von etwa *d* = 1,4 m und einen Umfang von *u* = 4,4 m haben. Um die richtige Größe des Ballons zu bestimmen, verknotet man eine 4,4 m lange Schnur zu einer geschlossenen Schlinge und legt diese immer wieder vorsichtig um den Ballon, während dieser befüllt wird. Hierbei ist jedoch unbedingt darauf zu achten, dass die empfindliche Ballonhülle nicht beschädigt wird.

Zu 3) Das „Feintuning“ erfolgt in beiden Fällen über den vom Ballon verursachten statischen Auftrieb, welcher sich durch ein Wägestück mit geeigneter Masse bestimmen lässt. Ideal

eignet sich dazu ein Wassereimer, dessen Masse durch das Wasservolumen im Inneren reguliert werden kann. Die Auftriebskraft kann mit Hilfe des bereits weiter oben erwähnten Onlineprogrammes http://predict.habhub.org ermittelt werden. Hierzu wird der „Burst Calculator“ der Seite verwendet, welcher beispielsweise für einen 300 Gramm Ballon bei einer Nutzlast von 400 Gramm und 5 m/s Aufstiegsgeschwindigkeit eine Auftriebskraft entsprechend einer Masse von knapp 1,2 kg ermittelt (vgl. Abbildung 2).

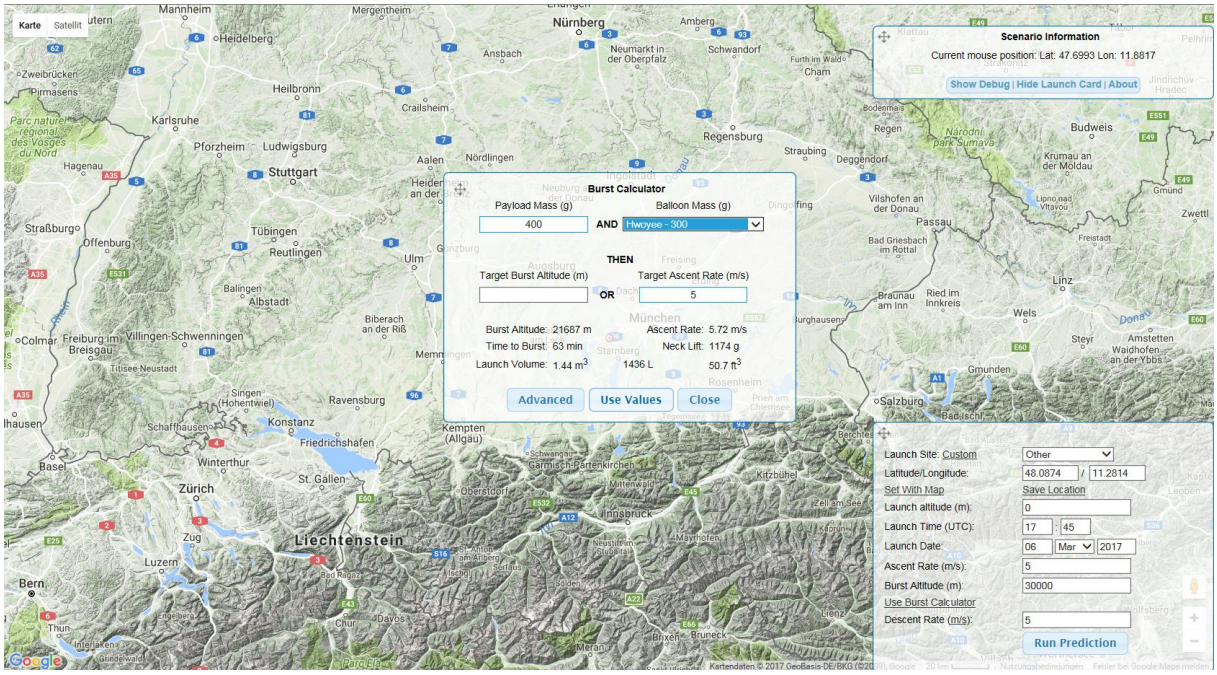


Abbildung 2: Burst Calculator des online Vorhersage Programms (Cambridge University Space Flight, 2010. Aufgerufen von http://predict.habhub.org)

Um den Ballon zu verschließen, verwendet man zweckmäßiger Weise Wiederöffnungskabelbinder. An diesen kann man dann auch sehr gut die Schnur zur Verbindung von Ballon und Fallschirm mit einem sicheren Knoten anbringen. **Achtung: Der Umgang mit dem Ballon setzt etwas Sorgfalt voraus, da die Ballonhülle sehr empfindlich ist! So empfiehlt es sich, den Ballon auf einer sauberen Decke und keinesfalls auf einem steinigen Untergrund auszubreiten sowie direkten Hautkontakt mit dem dünnen Ballonmaterial zu vermeiden, da die hauteigene Säureschutzschicht das Material angreift.** Ein beschädigter Ballon kann zu früh platzen!

Nach dem Befüllen des Ballons werden alle elektronischen Komponenten – in diesem Fall die Kamera und der GPS-Tracker – eingeschaltet und mit der Powerbank verbunden. Nach dem Verschließen der Sonde mit Klebeband wird der GPS-Tracker einer letzten Funktionsprüfung

unterzogen. Auf der Sonde müssen die Kontaktdaten (Name, Mobilnummer, Adresse, Emailadresse) des Ballonteams gut sichtbar und wasserfest angebracht werden. Der Start muss zur mit dem zuständigen Luftamt vereinbarten Uhrzeit erfolgen.

1.1.3. Bergung

Da Sendemasten des Mobilfunknetzes über eine relativ flache Abstrahlcharakteristik verfügen, ist Mobilfunkempfang oberhalb von 3.000 Metern nahezu ausgeschlossen – man muss sich nach dem Ballonstart demnach auf eine bis zu mehrere Stunden dauernde Funkstille einstellen. Je nachdem, wie sehr man seinem Glück vertraut und wie weit die zu erwartende Flugstrecke des Ballons ist, wird man sich bereits recht kurz nach dem Start auf den Weg zum vorherberechneten Landepunkt machen – insbesondere da die eigentliche Bergung nach dem Empfang der GPS-Position durchaus etwas Zeit in Anspruch nehmen kann. Die Vorhersagen des erwähnten Onlinetools sind erfahrungsgemäß auf wenige Kilometer genau zutreffend.

Vom Ablauf her hat es sich als sinnvoll erwiesen, zwei Stunden nach dem Start einen ersten Anruf beim GPS-GSM-Tracker vorzunehmen und diesen dann etwa halbstündig zu wiederholen. Dabei sollte man nicht zu schnell aufgeben: Unter Umständen kann auch einen Tag nach dem Ballonstart noch eine Ortung erfolgen, wenn sich beispielsweise die Bewölkungssituation und damit die Signalstärke von GPS und oder GSM verbessert.

Von den ungünstigen Landeszenarios ist das einer Baumlandung am wahrscheinlichsten. Mit etwas Glück trifft die Sonde jedoch auch freies Gelände. Andernfalls muss improvisiert werden. Eine lange Teleskopstange kann bei einer Baumlandung hilfreich sein, beim großräumigen Suchen kann ein Quadrocopter mit Kamera unterstützen. Ansonsten sei an dieser Stelle vor unüberlegten oder gar gefährlichen Aktionen insbesondere durch beteiligte Jugendliche gewarnt und zugleich viel Glück für eine erfolgreiche Bergung gewünscht!

1.2. Die Technik des „High Altitude Ballooning“

Für HAB Missionen gibt es eine Vielzahl möglicher Ballons, Fallschirmsysteme und mitgeführter Nutzlasten. Im Grunde kann jedes Gerät, welches die gesetzlich vorgegebenen Bestimmungen einhält mit einem Ballon in große Höhen befördert werden. Im Folgenden soll

ein exemplarischer Überblick über eine Auswahl an Ballons, Fallschirmsystemen und möglichen Nutzlasten gegeben werden.

1.2.1. Wetterballons

Die verwendeten Ballons bestehen aus hochelastischem Naturkautschuk und werden von verschiedenen Herstellern angeboten. Verkauft werden sie in unterschiedlichen Gewichtsklassen von 300g bis 3000g, wobei für unsere Zwecke nur Ballonmassen bis 2000g sinnvoll sind. Hersteller sind beispielsweise Totex oder K.K.S. aus Japan. Bezugsquellen für diese Spezialballons findet man im Internet. Auf Grund der viel zu geringen Elastizität sind für HAB-Missionen „normale“ (Riesen-) Luftballons ungeeignet.

1.2.2. Fallschirme

Die rechtlichen Bestimmungen schreiben die Verwendung eines Fallschirms explizit vor, um eine Gefährdung von Personen und/ oder Gegenständen auszuschließen (Europäische Kommission, 2012 und Deutsche Flugsicherung, 2016). Bewährt haben sich auf Grund der einfachen Bauform und damit einhergehenden vergleichsweise geringen Kosten, Rundkappenfallschirme aus dem Modellbaubereich. Diese erhält man im Internet für wenige Euro.

Von entscheidender Bedeutung ist die Größe des Fallschirmes, über welche sich die Abstiegsgeschwindigkeit regulieren lässt. In Bodennähe (ab ca. 5 km Höhe) muss diese maximal fünf Meter pro Sekunde betragen. Zur Berechnung dient folgende Abschätzung:

Die Luftwiderstandskraft befindet sich im stationären Sinkflug in guter Näherung in einem Kräftegleichgewicht mit der Gewichtskraft.

$$F_G = F_L$$

$$m \cdot g = \frac{1}{2} c_w \cdot \rho_L \cdot A_{proj} \cdot v^2$$

Dabei steht m für die Gesamtmasse, $g \approx 9{,}81\, {}^{N}/_{kg}$ für die Erdbeschleunigung [2], c_w ist der Form-abhängige[3] Widerstandsbeiwert, ρ_L ist die Luftdichte, welche auf Meeresniveau etwa

[2] Der Wert der Erdbeschleunigung ist vom Breitengrad und der Höhe des Beobachtungspunktes abhängig. Der hier abgebildete Wert bezieht sich auf den Wert bei 45° N auf Meereshöhe.

[3] Tatsächlich hängt c_w neben der Form des Körpers noch von anderen Faktoren ab, wie in Kapitel 3.2 beschrieben.

1,2 kg/m³ beträgt. Mit A_{proj}, der projizierten Fläche, geht die Größe des Fallschirms mit in die Berechnung ein, welche die Abstiegsgeschwindigkeit v maßgeblich beeinflusst und im Übrigen (neben der Fallschirmform) die einzige veränderbare Variable ist. Löst man die Gleichung nach A_{proj} auf, so erhält man:

$$A_{proj} = \frac{2m \cdot g}{c_w \cdot \rho_L \cdot v^2}$$

Abbildung 3: geöffneter Rundkappenfallschirm (Stratoflights, 2017. Aufgerufen von http://www.stratoflights.com/shop/fallschirm/).

Der Widerstandsbeiwert für Rundkappenfallschirme wird mit $c_w = 1{,}33$ angegeben. Geht man nun beispielsweise von einer Gesamtmasse (Sonde und Fallschirm) von 0,5 kg aus, so erhält man für die projizierte Fallschirmfläche:

$$A_{proj} = \frac{2 \cdot 0{,}5\ \mathrm{kg} \cdot 9{,}81\ \mathrm{N/kg}}{1{,}33 \cdot 1{,}2\ \mathrm{kg/m^3} \cdot (5\ \mathrm{m/s})^2} \approx 0{,}25\ \mathrm{m^3}$$

Nimmt man in guter Näherung eine kreisförmige Fläche an, so müsste der Fallschirm einen Durchmesser von knapp 60 Zentimetern haben, um diese Masse mit einer Geschwindigkeit unter fünf Meter pro Sekunde zu Boden zu bringen. In jedem Fall sollte eher ein etwas zu großer als ein zu kleiner Fallschirm verwendet werden, da dieser auch bei einer nicht vollständigen Öffnung noch ausreichend Bremswirkung erzielt.

1.2.3. Sonde

Die Sonde stellt den eigentlichen Grund für die gesamte HAB-Mission dar. Je nachdem, welches Ziel damit verfolgt wird, wird ihr Inhalt recht unterschiedlich ausfallen. Einige grundsätzliche Betrachtungen gelten jedoch für jede Mission. An erster Stelle sollten in jedem Fall Sicherheitsaspekte stehen. Harte oder scharfkantige Stellen an der Sonde sind daher unbedingt zu vermeiden. Von großer Bedeutung ist auch eine großflächige Krafteinleitung der Verbindungen mit dem Fallschirm. Diese muss sicherstellen, dass sich die Verbindungsschnüre nicht selbständig von der Sonde ablösen können. Als Materialien haben sich Styroporplatten, Klebeband („Gaffa“) und Kabelbinder bestens bewährt.

Da die mitgeführten elektronischen Geräte nur in einem bestimmten Temperaturbereich einwandfrei funktionieren, sollte die Sonde einigermaßen luftdicht verschlossen werden. Unter Umständen ist auch die Mitführung von Wärmepads zu empfehlen. Je nachdem, wie viel Abwärme die verbauten Elektrogeräte selbst produzieren, muss hier jedoch eine ebenfalls denkbare Überhitzung vermieden werden. In den meisten Anwendungsfällen genügt ein kleines Wärmepad vollkommen aus. Alternativ kann auch die Verwendung (teurer!) Lithiumbatterien empfohlen werden, welche auch bei Temperaturen bis -40°C noch ausreichend Kapazität haben.

Von besonderer Bedeutung ist ein Ortungssystem für die Nutzlast, welches meist durch einen GPS-GSM-Tracker realisiert wird. Vorteile wie geringe Kosten und Gewicht stehen der Abhängigkeit von Mobilfunk- und GPS-Empfang gegenüber. Da beides nicht immer gewährleistet ist, empfiehlt sich bei Verwendung von sehr teuren Nutzlasten die Bereitstellung eines redundanten Systems. Dies kann beispielsweise ein weiterer GPS-GSM-Tracker sein, dessen SIM Karte von einem anderen Mobilfunkprovider kommt, und der in einem anderen Winkel (Antennenlage!) eingebaut wird. Alternativ kann auch ein Ortungssystem realisiert werden (Amateurfunk, 2016), welches die GPS-Position über das Amateurfunkband versendet. Dies setzt jedoch profunde Kenntnisse der technischen und rechtlichen Rahmenbedingungen voraus, auf welche hier nicht genauer eingegangen werden kann.

Als teure aber gute Alternative kann die Verwendung eines Satelliten-GPS-Trackers empfohlen werden. Hierbei wird mittels GPS die Position des Trackers ermittelt und diese über ein

Satellitenkommunikationssystem wie beispielsweise das Globalstar System an den Nutzer Versand. Auf diese Weise wird Unabhängigkeit vom Mobilfunknetz erreicht. Die entsprechenden Geräte, wie der „SPOT-Trace“ sind zum einen in der Anschaffung mit etwa 150 €, aber auch im Betrieb erheblich teurer als „normale“ GPS Tracker, da für die Satellitenkommunikation Gebühren von mindestens 15 € im Monat anfallen.

1.2.4. Die „wissenschaftliche“ Nutzlast

Bekannt wurden HAB-Missionen durch die faszinierenden Aufnahmen der Erde, welche dabei entstehen. Diese wirken vor allem durch den dort bereits fast schwarzen Himmel fast wie Aufnahmen aus dem Weltraum, wenngleich dieser erst etwa 60 km höher, in etwa 100 km Höhe beginnt. Typischerweise führen daher auch die meisten Sonden eine oder mehrere Kameras mit. Durch den Einsatz spezieller Aufnahmesysteme besteht zudem die Möglichkeit, die Ballonmission zur Fernerkundung der Erde zu nutzen. Von übergeordnetem Interesse ist auch die Aufzeichnung von atmosphärischen Daten mit Hilfe von Mikrokontrollerboards wie Arduino.

1.2.4.1. Bilder der Erde und des Weltalls

Zur Aufnahme von Bildern der Erde, des Horizonts und des Weltalls eignen sich neben teuren Digitalkameras bereits kostengünstige, sogenannte Action Cams. Abhängig vom Modell sind diese bei vernünftiger Aufnahmequalität ab 40 € zu erhalten. Vor einem Kauf sollte man sich jedoch in jedem Fall Gedanken darübermachen, welchem übergeordneten Zweck die Aufnahmen dienen sollen. Beispielsweise könnte daraus in einem größeren Projekt ein Film entstehen. Eine weitere denkbare Anwendung stellen klein- und großräumige eigenständige Kartierungen dar. Während im ersten Fall insbesondere ein Kamerasystem benötigt wird, welches mit schnellen Helligkeitswechseln und den unter Umständen starken Drehbewegungen zurechtkommt, sind im zweiten Fall abbildungsgeometrische Effekte wie beispielsweise Bildkrümmungen zu beachten.

Auch der Blickwinkel der Kamera sowie der Einbau in der Sonde müssen im Vorfeld gut durchdacht werden: Welche Perspektive ist besonders interessant für mein Projekt? Kann sich das Kameraobjektiv gefahrlos im Freien befinden oder riskiere ich damit eine Beschädigung bei der Landung? Welcher Speicherplatz wird benötigt? Soll ein durchgängiger Film oder ein Zusammenschnitt aus vielen Sequenzen entstehen?

1.2.4.2. Fernerkundung von Vegetation

Die Klassifizierung von Erdoberflächen stellt ein wichtiges Feld der Satellitenfernerkundung dar. Während jedoch Satellitensensoren echte Hightech Geräte sind, können bestimmte Anwendungen mit relativ einfachen Mitteln nachempfunden werden. Hierzu benötigt man nur eine mit Farbfiltern modifizierte, kostengünstige Digitalkamera. Die meisten der darin eingesetzten Lichtdetektoren sind auch im nahen infraroten Wellenlängenbereich des Lichtes (bis ca. 1000 nm) empfindlich. Da gesunde Pflanzen die Sonnenstrahlung in diesem Bereich sehr stark reflektieren, ist die Reflektanz von Untergründen im nahen Infrarot ein Indikator für Vegetation (siehe Abbildung 4).

Diese spannende Technik ist im Internet(z.B. auf http://infragram.org) genauer beschrieben – man findet dort neben Bauanleitungen und einem online Bildbearbeitungsprogramm auch einen Shop, welcher derart modifizierte Kameras zu relativ günstigen Preisen verkauft. Bei Schüttler, Zepp & Girwidz (2017) finden sich zudem Informationen über die wissenschaftliche Aussagekraft dieser Aufnahmen.

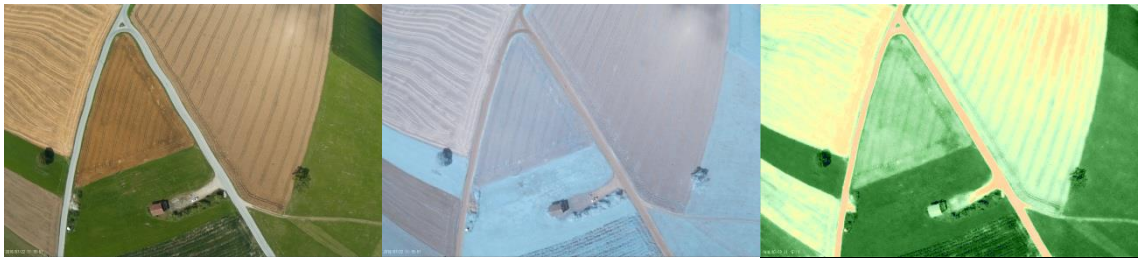


Abbildung 4: Drei verschiedene Darstellungsformen einer Landschaft: (1) RGB-echtfarben Bild (2) Infrarotaufnahme mit Farbfilter (3) NDVI-Falschfarbenbild. Das Falschfarbebild dient der Vegetationsanalyse: Gesunde Vegetation ist grün, andere Flächen mehr oder weniger bräunlich dargestellt.

1.2.4.3. Messung von atmosphärischen Parametern

Seit einigen Jahren erfreuen sich Mikrokontrollerboards wie Arduino großer Beliebtheit, da sich damit eine Vielzahl von Sensoren auslesen lassen. Die erforderlichen Programme findet man bereits Großteils im Netz und muss sie nur an die jeweiligen Gegebenheiten anpassen.

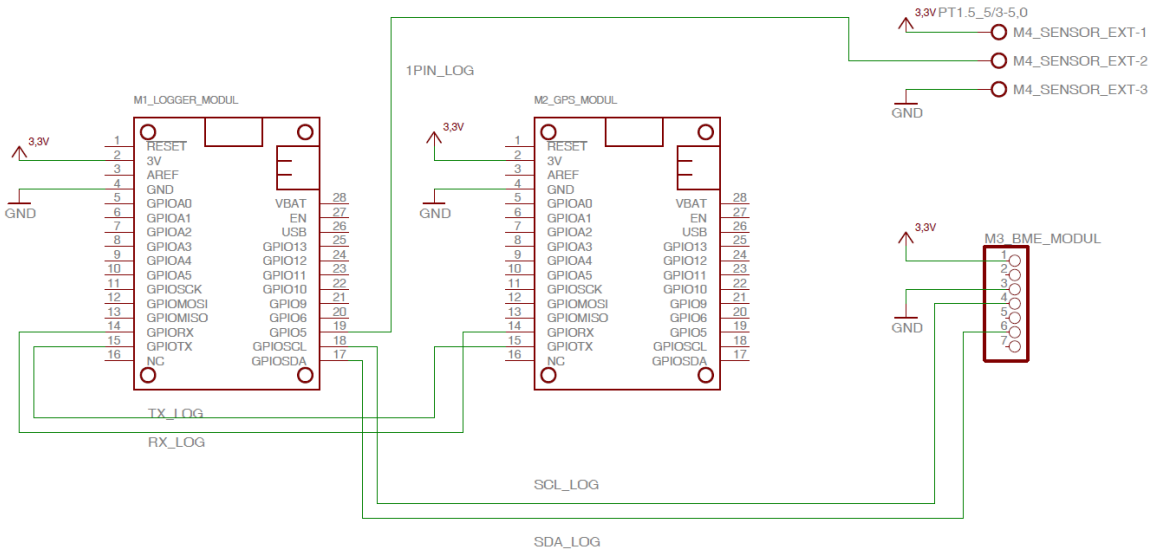


Abbildung 5: Schaltplan des „StratoIno“ Datenloggers. Er basiert auf Adafruit Feather boards und Shields und wird in Arduino programmiert.

Im Rahmen des Projektes SatTec wurde am Lehrstuhl für Didaktik der Physik der LMU München der kleine Datenlogger „StratoIno“ entwickelt, welcher Messungen verschiedener Parameter an Bord eines Stratosphärenballons ermöglicht. Gemessen werden Temperatur und relative Feuchte innerhalb und außerhalb der Sonde, Luftdruck und die Position mittels GPS. Das Logintervall beträgt 5 Sekunden, kann jedoch bei Bedarf geändert werden. Programmiert ist der Datenlogger in der Arduino Programmiersprache, um ein Verändern des Codes zu vereinfachen. Sowohl die Programme als auch Informationen zur Hardware befinden sich auf der Projekthomepage www.sattec.org zum Download.

Die Anwendungsmöglichkeiten für HAB-Missionen sind vielfältig und letztlich nur durch die zur Verfügung stehende Nutzlastmasse von bis zu maximal zwei Kilogramm sowie einige sicherheitsrelevante Aspekte eingeschränkt. Im folgenden Kapitel sollen, als Anregung zum Weiterdenken, einige ausgewählte wissenschaftliche Projekte vorgestellt werden, bei denen Stratosphärenballons als Trägerplattform zum Einsatz kommen.

2. Einsatzgebiete von Stratosphärenballons in der Wissenschaft

Hauptsächlich werden Stratosphärenballons mit Radiosonden für meteorologische Messungen eingesetzt. Diese bieten auch im 21. Jahrhundert noch als Einzige die Möglichkeit, atmosphärische Parameter in großer Höhenauflösung zu erfassen. Es gibt jedoch auch Ballonmissionen für andere Bereiche der Wissenschaft und Technik, welche zwar weniger bekannt aber nicht weniger interessant sind – im Gegenteil.

2.1. Außergewöhnliche, wissenschaftliche Projekte mit Stratosphärenballons

Stratosphärenballons bieten eine verhältnismäßig kostengünstige und schnell verfügbare Möglichkeit, auch größere und schwerere wissenschaftliche Nutzlasten in große Höhen zu befördern. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass die bei einem Ballonaufstieg auftretenden mechanischen Belastungen im Vergleich, beispielsweise zu Raketenmissionen, sehr gering sind. Dies macht sie für eine ganze Reihe von Anwendungen in der Forschung, im militärischen Bereich, aber auch für den Bereich Ausbildung interessant. So nutzte zum Beispiel die NASA, vorbereitend zu bemannten Weltraummissionen, Ballonaufstiege in große Höhen der Stratosphäre, um Raumanzüge ihrer Astronauten zu testen. Dieser Gedanke wurde Jahre später vom Extremsportler Felix Baumgartner aufgegriffen, wenn auch mit einer ganz anderen, eher medialen Zielsetzung. Die drei im Folgenden beschrieben Projekte sind sehr spezifisch in ihren Forschungsfragen und sollen lediglich ein Gefühl dafür vermitteln, wie vielfältig die Forschungsmöglichkeiten mit Stratosphärenballons sein können.

2.1.1. Autonomes Fliegen in der Stratosphäre

Im Rahmen des Projektes „HABLEG“ (High Altitude Balloon Launched Experimental Glider) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt wurde ein unbemanntes Segelflugzeug mit Hilfe eines großen, mit Wasserstoff befüllten Ballons in 20 km Höhe gebracht und dort kontrolliert vom Ballon getrennt (Wlach, Schwarzbach und Laiacker, 2015). Auf Grund der extrem geringen Luftdichte stellte der anschließende Übergang in einen stabilen Gleitflug eine große und regelungstechnisch überaus anspruchsvoll zu bewältigende Herausforderung dar, welche bislang nur wenigen Wissenschaftlern weltweit gelungen ist. Die große Besonderheit bei HABLEG war, dass diese kritische Flugphase vollkommen autonom durch die an Bord befindliche Elektronik bewältigt werden musste.

Abbildung 6: Start des Gleiters mit 3 m Spannweite (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), 2015. Abgerufen von http://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10261/371_read-13886/#/gallery/19701).

Während des einstündigen Gleitfluges über eine Strecke von mehr als 170 km, konnten alle Flugeigenschaften und Systemfunktionen überprüft und bestätigt werden. Der Gleiter landete schließlich sanft und sicher am Forschungsgelände der schwedischen Raketenbasis ESRANGE in Kiruna. „Den Entwicklern diente der Flug zur Technologieerprobung für Höhenflugzeuge, vor allem in den Bereichen Aerodynamik, System und Software. Zukünftig kann auf Basis dieser Technologie die Forschung für Stratosphärenplattformen weitergeführt werden“ (DLR, 2015). Zudem wurden während des Fluges auch sehr detailreiche Aufnahmen von der Erde erzeugt.

2.1.2. Fernerkundung zu Ausbildungszwecken

Die Aufnahme von optischen Fernerkundungsdaten stellt ein weiteres Feld der Forschung mit Stratosphärenballons dar. Neben vergleichsweise geringen Kosten ist die überaus rasche Verfügbarkeit einer derartigen Mission für Wissenschaftler besonders interessant. Entsprechende Startgenehmigungen vorausgesetzt, kann ein Stratosphärenballon innerhalb eines Tages mit der entsprechenden Sensorik ausgerüstet und gestartet werden. Dies ermöglicht einen zeitlich überaus flexiblen Einsatz.

Für Projekte im Bereich der Ausbildung von wissenschaftlichem Nachwuchs ist jedoch der Kostenfaktor entscheidend. Um ein aktuelles Beispiel zu nennen: Wissenschaftler der

Montana State University in den USA entwickelten eine kostengünstige Möglichkeit von Ballons aus, per Infrarot-Fernerkundung, die Vegetation zu erforschen (Shaw, J. A., Nugent, P. W., Kaufman, N. A., Pust, N. J., Mikes, D., Knierim, C., ... & Knighton, W. B., 2012). Dieses Projekt basiert auf einfachen Digitalkameras und anderen frei zu erwerbenden Komponenten. Mit Hilfe von speziellen Rot- und NIR-Filtern (NIR: nahes Infrarot) vor ballongetragenen Kameras, können auf diese Weise großflächig sogenannte „NDVI Bilder“ erstellt werden. Dieser „Normalized Differenced Vegetation Index“ ist einer der wichtigsten in der Fernerkundung eingesetzten Vegetationsindices, welcher Aussagen zur Vitalität der Pflanzen ermöglicht.

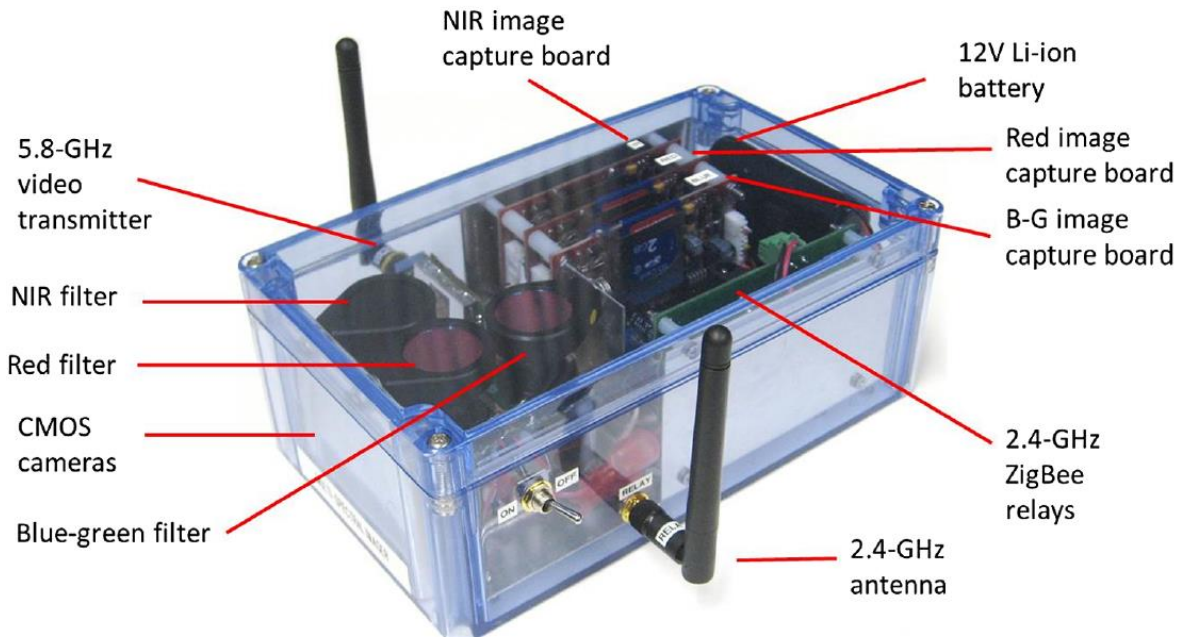


Abbildung 7: Aufnahmesystem für NDVI-Bilder vom Fesselballon aus (Shaw et al., 2012).

Die Technik wurde eingesetzt im Rahmen eines Kooperationsprojektes mit Studenten aus sieben verschiedenen amerikanischen Hochschulen für amerikanische Ureinwohner. Das Ziel war, auch Minderheitengruppen moderne Technik zur Umweltfernerkundung zu bezahlbaren Preisen verfügbar zu machen, weshalb die zusammengestellten Sets einen Preis von US $ 1000 nicht überschreiten durften. Die mit den kostengünstigen Kamerasystemen erstellten Aufnahmen erwiesen sich als so valide, dass die Sets nun auch für wissenschaftliche Zwecke im Einsatz sind.

2.1.3. Das Sunrise Teleskop

Um die Sonne von einer in der Stratosphäre befindlichen, ballongetragenen Plattform aus zu beobachten, wurde das Sunrise Teleskope entwickelt (siehe Abbildung 8). Dieses flog im Juni 2009 zum ersten Mal von ESRANGE (nahe Kiruna/Schweden) nach Somerset Island in Nordkanada (Barthol et al., 2011). Ziel war es die Struktur und Dynamik des solaren magnetischen Feldes mit Hilfe des 1-m Teleskopes zu studieren. Dabei kam es auf eine gute zeitliche Auflösung an, um schnelle Änderungen im magnetischen Feld zu beobachten. Zudem musste der Blickwinkel groß genug sein, um statistisch fundierte Aussagen zu relevanten Ereignissen treffen und die Evolution der magnetischen Struktur in allen Phasen ihres Zyklus erfassen zu können.

Abbildung 8: Sunrise kurz vor dem Start. Der Ballon ist am Boden nur zum Teil mit Helium gefüllt, um sich während des Aufstieges bei abnehmendem Druck ausdehnen zu können. Bei einer Höhe von 37km wird der Ballon sich um das 300-fache vergrößert haben. Auch bei dieser Mission verbindet ein Fallschirm den Ballon mit der Sonde. (Barthol et al., 2011).

Diese Mission zeigte die Vorteile und das hohe Potential von ballongetragenen Solarbeobachtungen aus der Stratosphäre:

- Vernachlässigbare Verschlechterung der Bilder durch die Atmosphäre

- UV Bereich kann bis zu 200 nm beobachtet werden (kaum Ozonschicht!)
- Instrumente können wiederverwendet werden
- Geringere Kosten im Vergleich zu Weltraummissionen
- Beobachtungen über eine längere Zeit mit konstanten Bedingungen
- Keine Behinderung der Sicht

Sunrise hatte die komplexeste und größte Nutzlast in der Geschichte der solaren Ballonmissionen: Die Gondel am Ballon war mit einem 1-m Teleskop, einem Multi-Wellenlängen UV-Filter-Imager, einem Vektor-Magnetographen und Geräten für die Ausrichtungskontrolle und die Bildstabilisation ausgerüstet. Der verwendete Ballon hatte ein Fassungsvermögen von 975.000 m³, was einem Durchmesser von nahezu 134 m entspricht. Damit kann eine Masse von circa 6 Tonnen in die Stratosphäre bis in eine Höhe von über 37 km transportiert werden. Die wissenschaftliche Nutzlast hatte dabei „gerade einmal“ eine Masse von 1920 kg. Der Rest wurde für den Ballon (2330 kg), das Helium (500 kg), Hilfsmittel und Ballast (544 kg) benötigt.

Die Sunrise Mission wurde erstmals am 8. Juni 2009 erfolgreich durchgeführt. Nach circa 3 Stunden erreichte der Ballon eine Höhe von 37,2 km. Zonale Winde transportierten das Ballongespann mit nahezu konstanter Geschwindigkeit von 30 km/h nach Nordkanada. Die Mission dauerte 137 h an, wobei eine Strecke von 4350 km zurückgelegt wurde (siehe Abbildung 9). Nachdem Sunrise gelandet war, wurden nur geringfügige Beschädigungen festgestellt, sodass die Mission ohne großen finanziellen Aufwand bei einer erhöhten Sonnenaktivität wiederholt werden konnte. Die Nutzlast zeigte während des Fluges immer Richtung Sonne und hatte dabei die ganze Zeit über freie Sicht. Die komplette Beobachtungszeit mit Bildstabilisierung umfasste 33 h, in welchen fast 56.000 Bilder in den Wellenlängenbereichen von 210-400 nm gesammelt werden konnten. Dabei befand sich das System fast über der gesamten Ozonschicht der Erde.

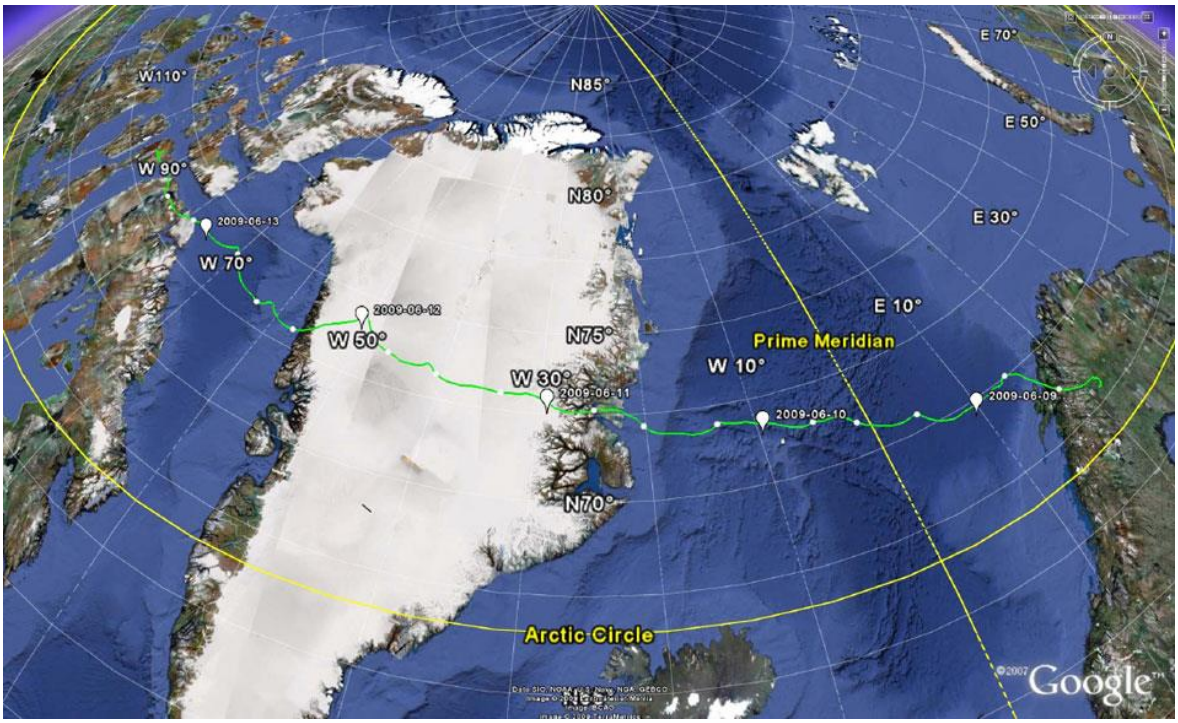


Abbildung 9: Flugroute von Sunrise (Barthol et al., 2011).

Die drei vorgestellten Beispiele sollen einen kleinen Eindruck über die Vielfalt der Forschungsmöglichkeiten mit HAB-Missionen vermitteln – bei Interesse findet man im Internet unter dem Suchbegriff „High Altitude Balloon“ noch viele weitere Beispiele. Am häufigsten geht es jedoch bei Ballonaufstiegen in die Stratosphäre um die Messung von Wetterparametern. Diese Wetterballonaufstiege werden daher im Folgenden etwas genauer betrachtet.

2.2. Radiosonden

Eine Radiosonde ist ein Messgerät, welches in der Aerologie seine Anwendung findet. Sie kann im Gegensatz zu Wettersatelliten und anderen fernerkundlichen Messverfahren direkte Messungen in der Atmosphäre mit einer sehr guten Höhenauflösung und Genauigkeit vornehmen. Somit kann ein Eindruck vom momentanen Zustand der einzelnen atmosphärischen Schichten gewonnen werden. Wie ihr Name bereits verrät, besteht eine Radiosonde im Wesentlichen aus zwei Komponenten: a) einem Sendeteil (Radio) und b) einem Messgerät (Sonde). Mit den verschiedenen Messfühlern kann direkt die Lufttemperatur, Luftfeuchte und der Luftdruck gemessen werden, während der Höhenwind über den Versatz der Radiosonde indirekt über Radarverfolgung oder GPS bestimmt wird. Der Aufbau einer Radiosonde wird in Abbildung 10 dargestellt.

Moderne Radiosonden haben inklusive Batterien Massen um lediglich 250 g, wodurch die Größe der verwendeten Ballons ebenso wie die benötigte Füllmenge an Helium bzw. kostengünstigerem Wasserstoff in Grenzen gehalten werden können. Zum Aufstieg der Radiosonde wird ein Wetterballon verwendet. Dabei kann die Sonde Höhen von 20-35 km erreichen. Der Höhenrekord für operationelle Aufstiege im Deutschen Wetterdienst (DWD) liegt derzeit bei 40.285 m und wurde am 22.06.2005 am Observatorium Lindenberg aufgestellt (DWD, 2016a).

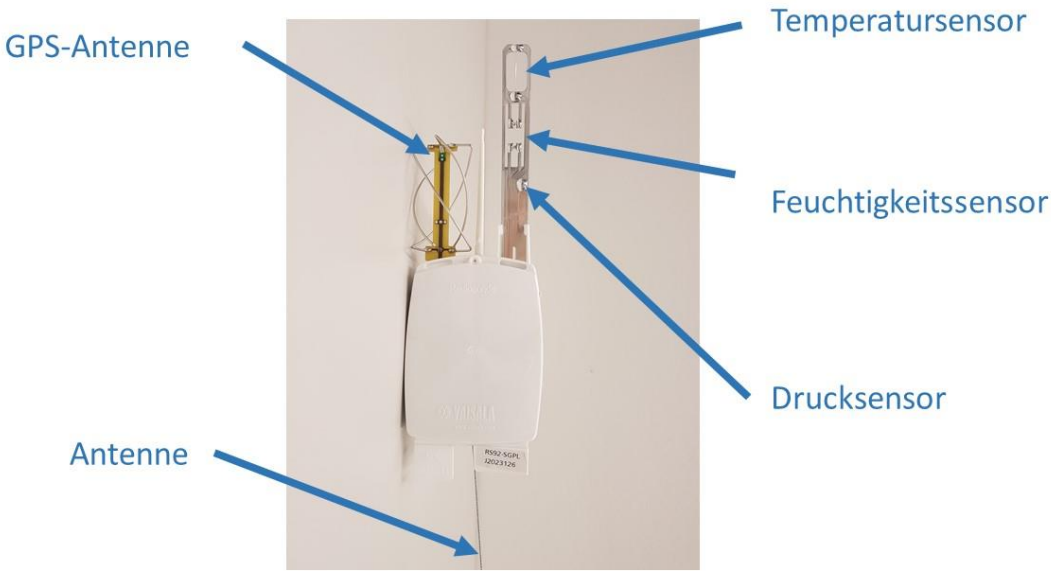


Abbildung 10: Aufbau einer Radiosonde.

Die Aufstiegsgeschwindigkeit des Ballons liegt typischerweise bei circa 5 m/s. Während des Aufstiegs vermisst die Sonde kontinuierlich die jeweils gewünschten Messgrößen und sendet diese über eine Antenne direkt an eine Bodenstation. Wenn an der Sonde noch zusätzlich ein Reflektor befestigt ist, kann sie durch Radar geortet werden; ansonsten wird die Position über GPS ermittelt und ebenfalls per Funk an die Bodenstation übertragen. Alle Teile der Sonde sind mit Schnüren aneinander befestigt, wobei die Sonde sich 10-30 m unter dem Ballon befindet. Dieser scheinbar große Abstand ist erforderlich, damit sich die Sonde in einem möglichst nicht vom Ballon gestörten Luftbereich bewegt.

Während des Ballonaufstiegs nimmt mit zunehmender Höhe der Luftdruck ab. Während dieser zu Beginn noch etwa 1 Bar (auf Meeresniveau) beträgt, ist er in 35 km Höhe auf etwa zehn Millibar gefallen. Der Ballon dehnt sich dadurch mit zunehmender Höhe auf einen

Durchmesser von anfangs unter einem Meter auf bis zu zwölf Meter aus. Wenn die Grenze der Dehnbarkeit des Ballonmaterials erreicht ist, zerplatzt der Ballon und die Sonde fällt, durch einen Fallschirm gebremst, zur Erde zurück. Zum Erreichen derart großer Höhen ist es zwingend erforderlich, hoch flexibles Material, welches sich entsprechend ausdehnen kann, zu verwenden. Andernfalls würde sich bei statischem Material nach einiger Zeit eine Grenzhöhe einstellen, in welcher sich Gewichts- und Auftriebskraft im Gleichgewicht befänden. Dies ist beispielsweise bei einfachen, heliumgefüllten (Kinder-) Luftballons der Fall.

Die Messwerte einer Radiosonde haben, je nach Dynamik der Atmosphäre, nur für eine mehr oder weniger kleine Umgebung des spezifischen Ortes und nur für die Zeit des Aufstieges eine echte Aussagekraft. Um eine gute Datengrundlage aller Messparameter für Wettervorhersagen zu erlangen, müssen daher an vielen verschiedenen Orten weltweit zu festgelegten Terminen Sondenstarts vorgenommen werden. International wurden Standardstarttermine für Stratosphärenballons auf 00, 06, 12, und 18 UTC festgelegt, wobei einige Stationen nur um 00 und 12 UTC operieren.

In Deutschland gibt es 14, auf der Nordhalbkugel insgesamt circa 700 und weltweit circa 850 Stationen, welche operationell Radiosonden starten. Fünf der 14 Stationen in Deutschland sind vollautomatisiert. Die Mehrheit der weltweit gestarteten Sonden steigt von festen Stationen aus auf, etwa 30 Radiosonden starten täglich von Schiffen. Allerdings sind die Stationen global sehr ungleich verteilt. Während die entwickelten Länder der nördlichen Hemisphäre über 80% der Sondenstarts durchführen, ist deren Anzahl in der südlichen Hemisphäre sehr viel geringer. Die University of Wyoming bietet auf ihrer Internetseite (http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html) weltweit frei zugänglich, kostenfreie, aktuelle Messwerte von Radiosondenaufstiegen an (vgl. Abbildung 11).

Abbildung 11: Die Messwerte vieler Radiosondenaufstiege weltweit sind im Netz kostenfrei erhältlich (University of Wyoming, o.J. Aufgerufen von http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html)

Da sich Europa in einer Westwindzone befindet, sind die Landepunkte der Sonden dort meist östlich von ihrem Startpunkt. Unter typischen Wetterbedingungen liegt die mittlere Entfernung zwischen Start- und Landepunkt eines Stratosphärenballons bei circa 100-300 km. Detaillierte Informationen zur Technik von Radiosonden, deren Empfang und die verschiedenen Startorte findet man im Internet.

3. Physikalische Grundlagen

Radiosonden stellen ein wichtiges Messinstrument für atmosphärische Parameter dar und sind wegen ihrer großen Höhenauflösung trotz enormer Fortschritte in der Fernerkundung auch heute noch unverzichtbar zur Erfassung der Schichtung der Erdatmosphäre. Ein großer Teil der Erkenntnisse über die Lufthülle unserer Erde geht auf direkte Messungen mit Radiosonden zurück. Im folgenden Kapitel wird ein kurzer Überblick über Aufbau und Zusammensetzung der Atmosphäre gegeben.

3.1. Die Atmosphäre der Erde

Unter der Erdatmosphäre (von griechisch atmos: Dunst, und sphaira: Kugel) versteht man die gasförmige Hülle um die Erdoberfläche (vgl. Abbildung 12). Sie unterliegt neben der Anziehungskraft auch Trägheitskräften wie der Corioliskraft, welche aus der Rotation der Erde herrühren. Hinzu kommen konvektive Kräfte, welche aus Dichteunterschieden resultieren. Das im Detail überaus komplexe Wechselspiel aller Kräfte ist für die Dynamik der Atmosphäre und damit für das Wetter- und Klimageschehen verantwortlich. Eine detaillierte Abhandlung

hierzu kann im Rahmen dieses Leitfadens nicht stattfinden. Für eine tiefergehende Auseinandersetzung sei auf die Links und Literatur im Anhang hingewiesen.

Die Atmosphäre hat eine Masse von circa 5 Billiarden Tonnen. Der mittlere Druck von 1013 Hektopascal auf der Erdoberfläche ermöglicht es, zusammen mit entsprechenden Temperaturen, dass auf der Erde Wasser im flüssigen Aggregatszustand existiert und Leben, so wie wir es kennen, möglich ist.

Abbildung 12: Erdatmosphäre aufgenommen mit einer Mobius Action Cam während dem Ballonaufstieg im März 2017. Die Krümmung der Erde entspricht nicht der wahren Erdkrümmung, sondern entsteht durch die Optik der Kamera.

3.1.1. Zusammensetzung der Erdatmosphäre

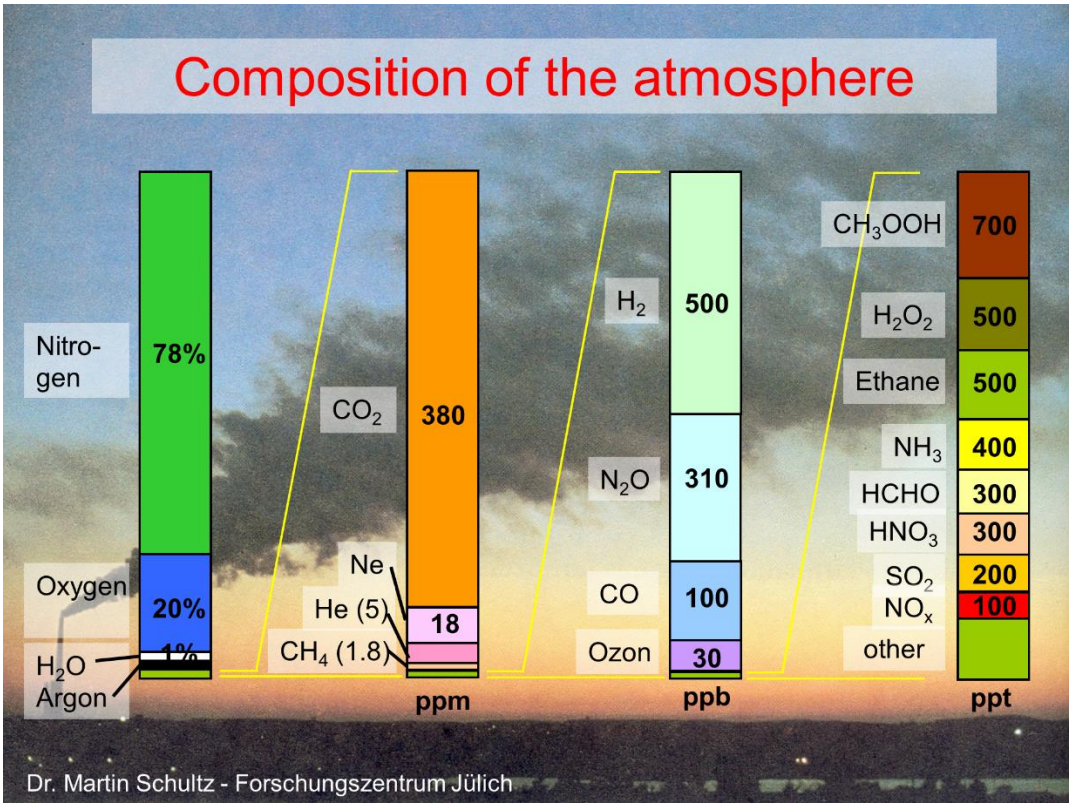


Abbildung 13: Zusammensetzung der Atmosphäre (mit freundlicher Genehmigung von Dr. Martin Schultz, 2016).

Die Erdatmosphäre besteht chemisch bis zu einer Höhe von circa 80-90 km zu 78 % aus Stickstoff (N_2), zu 20 % aus Sauerstoff (O_2) und zu 1 % aus einem Gemisch von Argon (Ar), Kohlenstoffdioxid (CO_2), Wasserstoff (H_2) und anderen Gasen (siehe Abbildung 13). Diese Schicht mit relativ konstanter Zusammensetzung wird auch „Homosphäre“ genannt. Darüber kommen vorwiegend Gase mit geringerer Dichte vor.

Für das Wettergeschehen in der Atmosphäre ist neben der Energiezufuhr durch die Sonneneinstrahlung hauptsächlich der Wasserdampf verantwortlich. Dieser kommt in wechselnder Konzentration von 0 % bis etwa 4 % des Luftvolumens vor.

3.1.2. Aufbau der Atmosphäre

Die Atmosphäre wird entsprechend ihres Temperaturverlaufs in verschiedene Schichten eingeteilt. Die Höhenausdehnung der Atmosphäre kann je nach Tages-, und Jahreszeit sowie in Abhängigkeit vom Breitengrad variieren (siehe Abbildung 14).

Die Höhenangaben der einzelnen Schichten sind nicht eindeutig und unterscheiden sich zum Teil je nach Quelle. Die hier genannten Werte stammen vom DWD (DWD, 2016b). Demnach

reicht die unterste Atmosphärenschicht, die Troposphäre, von der Erdoberfläche bis zu circa 7 km über den Polen und 17 km über dem Äquator. Im Sommer ist dieser auch als Wetterschicht bezeichnete Teil der Erdatmosphäre aufgrund der Wärmeausdehnung dicker als im Winter. Sie enthält 99 % des Wasserdampfes und 90 % der Masse der Atmosphäre. Dies bedeutet, dass sich in der untersten Atmosphärenschicht von nur etwa 15 km Dicke fast die gesamte Luft befindet. Die Eigenschaften der Luft in dieser Schicht werden durch Temperatur, Luftfeuchte, Bewölkung, Niederschlag, Luftdruck, Windrichtung und –stärke bestimmt. Zur Erhebung dieser Parameter tragen Wetterballons einen wichtigen Teil bei. Das Wissen über diese physikalischen Größen ermöglicht es Meteorologen, Wettervorhersagen und Klimaszenarien zu erstellen.

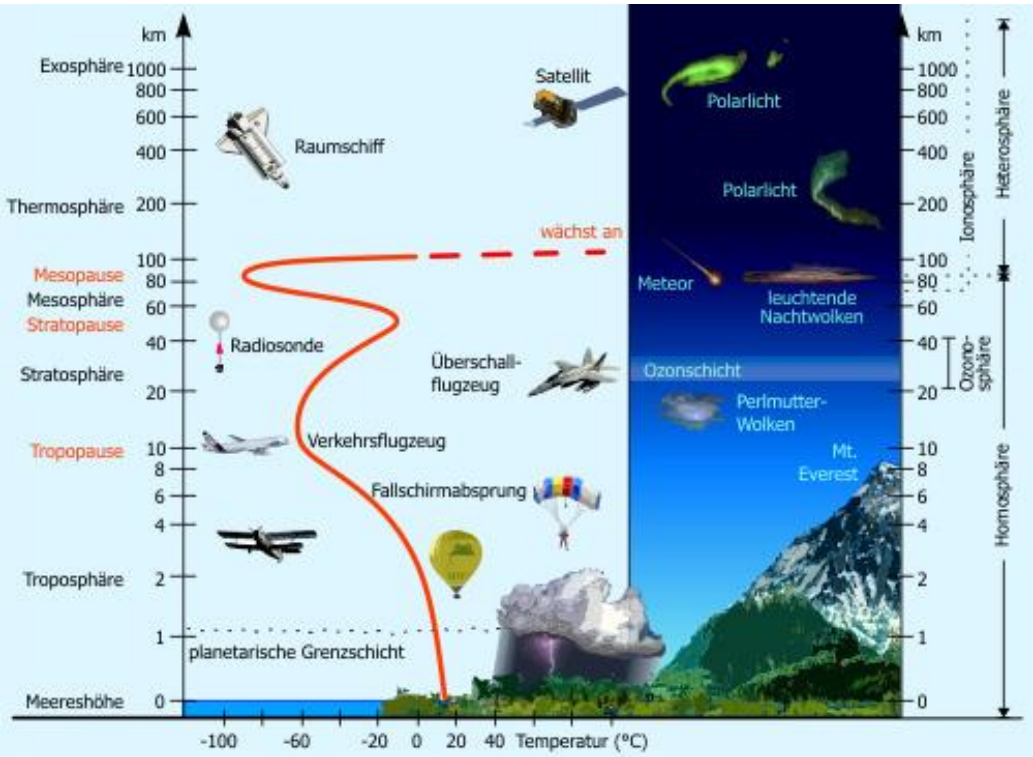


Abbildung 14: Aufbau der Atmosphäre und Temperaturverlauf (DWD, 2016b).

Die Troposphäre wird nach oben hin begrenzt von der sogenannten Tropopause. Sie ist als Inversionsschicht dadurch gekennzeichnet, dass die Lufttemperatur ab dieser Höhe langsam wieder zunimmt. Sie vermittelt den Übergang zur darüber liegenden Stratosphäre. Diese Schicht, in welcher sich auch die für das Leben so wichtige Ozonschicht befindet, reicht bis in eine Höhe von 50 km und wird von der Stratopause begrenzt. Darauf folgt die Mesosphäre, welche in einer Höhe von rund 80 km bei der Mesopause endet. Diese schließt auch zugleich den homogenen Teil der Erdatmosphäre ab.

Die Teilchendichte der sich anschließenden, bis in eine Höhe von circa 800 km reichenden Thermosphäre ist bereits so gering, dass man in der Raumfahrt ab 100 km Höhe von „echtem Weltraum“ spricht. Dass dies nicht vollkommen korrekt ist, erkennt man auch daran, dass erdnahe Satelliten, wie die internationale Raumstation ISS, durch die schwache, aber eben doch vorhandene Restatmosphäre in ihrer Bahngeschwindigkeit gebremst werden und von Zeit zu Zeit durch kurze Antriebsphasen wieder in einen korrekten Orbit überführt werden müssen. Andernfalls würden sie über kurz oder lang an Höhe verlieren und schließlich in den unteren Atmosphärenschichten verglühen. Die Exosphäre bildet die äußerste Schicht der Erdatmosphäre (bis zu 10.000 km) und stellt somit den Übergang zum luftleeren Weltall dar.

3.1.3. Temperaturverlauf der Atmosphäre

Die Temperatur in der unteren Atmosphäre nimmt, mit grober Näherung, in Bodennähe linear mit der Höhe ab. Sie verringert sich in der Troposphäre von im Mittel + 15°C auf -55°C. Dabei beträgt die mittlere Temperaturabnahme pro Höhenkilometer etwa 5 – 7 K. Dieser negative Temperaturgradient kann dadurch erklärt werden, dass die Troposphäre nur minimal durch die direkte Sonneneinstrahlung von oben und vielmehr direkt durch Kontakt mit der erwärmten Erdoberfläche von unten her erwärmt wird. Durch Konvektion findet in Folge daraus eine Durchmischung der Luftmassen statt. Eine weitere Ursache für den negativen Temperaturgradienten liegt in der hohen Konzentration von Treibhausgasen, welche die von der Erdoberfläche reflektierte Wärmestrahlung absorbieren.

Die darüber liegende Tropopause wird auch als „Ort der Umkehr des Temperaturgradienten“ bezeichnet. Diese Inversionsschicht bildet eine natürliche Sperrschicht, an welcher das Wettergeschehen im Normalfall endet. In dieser kalten Grenzschicht herrschen recht konstant niedrige Temperaturen von circa – 55°C.

Dagegen nimmt die Temperatur in der Stratosphäre – bei deutlich geringerer Teilchendichte – wieder auf bis zu circa 0°C zu. Der Temperaturanstieg lässt sich in erster Linie auf Prozesse in der ebenfalls dort in etwa 25 km Höhe befindlichen Ozonschicht zurückführen, welche insbesondere die kurzwelligen, hochenergetischen Anteile der UV-Strahlung der Sonne absorbiert und teilweise in Wärme umwandelt. Die Ozonschicht ist damit für das Leben auf der Erde von großer Bedeutung und steht seit den frühen 1980-er Jahren im Licht der Öffentlichkeit. Durch den unkontrollierten Eintrag von Fluorchlorkohlenwasserstoffen kommt

es zur als „Ozonloch“ bekannten Ausdünnung der unter Normalluftdruck nur wenige Millimeter dünnen Schicht, wodurch insbesondere mehr UV-B Strahlung den Erdboden erreichen kann. Ein erhöhtes Risiko für Hauterkrankungen vom einfachen Sonnenbrand bis hin zu Hautkrebs ist die Folge. Seit einigen Jahren zeichnet sich, dank des weltweiten Verbotes von ozonschädlichen FCKWs, eine Erholung der Ozonschicht ab (Solomon et al., 2016). Jedoch kann auf Grund der langen Zeitskalen, in denen Veränderungen in der Stratosphäre stattfinden, noch keine Entwarnung gegeben werden.

Als Stratopause wird der Übergangsbereich zur sich anschließenden Mesosphäre bezeichnet. In dieser sinken die Temperaturen wegen der niedrigen Dichte und der geringen Ozonkonzentration wieder auf circa -80°C ab, bis in der Mesopause eine erneute Umkehr des Temperaturgradienten stattfindet. Die Mesosphäre stellt den Übergangsbereich zwischen der unteren Atmosphäre und dem Weltraum dar und ist Gegenstand einer ganzen Reihe von aktuellen Forschungsvorhaben. Insbesondere mögliche anthropogene Einflüsse sowie das Wechselwirken mit den anderen Schichten mittels atmosphärischer Wellen stehen dabei im Fokus.

Die Dichte der darüber liegenden Thermosphäre beträgt nur circa 1 Zehnmilliardstel der Atmosphärendichte auf Meereshöhe. Daraus resultiert eine mittlere freie Weglänge zwischen einzelnen Luftmolekülen von einigen Kilometern, sodass Energieaustausch zwischen einzelnen Teilchen kaum stattfinden kann. Die hochenergetische Strahlung trifft fast ungefiltert auf die Luftmoleküle in der Thermosphäre, ionisiert sie und beschleunigt diese auf hohe Teilchengeschwindigkeiten, was zu einem Temperaturzuwachs des Gases auf bis über 1700°C führt. In der Thermosphäre entstehen auch die überaus beeindruckenden Polarlichter. Der stark ionisierte Bereich bis etwa 500 km Höhe wird auch als Ionosphäre bezeichnet. Aufgrund ihrer Fähigkeit zur Wechselwirkung mit Radiowellen kommt der Ionosphäre für den Funk über große Entfernungen eine große Bedeutung zu. Für die Satellitennavigation mit GPS und GLONASS ist sie eine der wichtigsten Fehlerquellen, da die Funksignale auf ihrem Weg durch die Ionosphäre, je nach Dicke und Ionisierung unterschiedlich stark gebrochen werden.

In der Exosphäre schließlich können die Gasmoleküle das Gravitationsfeld der Erde verlassen, da zum einen deren Geschwindigkeit hier sehr hoch und zum andern die Teilchendichte so gering ist, dass eine Bremswirkung durch Stöße vernachlässigt werden kann. Den hohen

Geschwindigkeiten entsprechen Temperaturen von über 1000°C, wobei jedoch die extrem geringe Teilchendichte zu berücksichtigen ist.

3.1.4. Internationale Standardatmosphäre (ISA)

Die realen Eigenschaften der Erdatmosphäre sind sehr variabel und können nicht für einen bestimmten Ort zu einer bestimmten Zeit exakt festgelegt werden. Daher definiert die International Civil Aviation Organization (ICAO) als Referenzmodell für die Luftfahrt die internationale Standardatmosphäre (ISA), welche wichtige Kenngrößen der Atmosphäre festlegt, und als Grundlage vieler (u.a. physikalischer) Berechnungen und Messungen dient.

Tabelle 2: Referenzdaten der ISA.

Lufttemperatur (NN)	15°C (288,15K)
Luftdruck (NN)	1013,25 hPa
Luftdichte (NN)	1,225 kg/m3
Tropopausenhöhe	11 km AGL
Lufttemperatur Tropopause	-56,5 °C
Schichtungsgradient bis 11.000 m Ü. NN	-0,0065 K/1 m (Abnahme mit der Höhe)
Schichtungsgradient von 11 km – 20 km ü. NN	0 K (keine Temperaturänderung)
Schichtungsgradient von 20 km – 32 km ü. NN	0,0010 K/m (Zunahme mit der Höhe)

Die ISA ist bis zu einer Höhe von 32 km festgelegt und resultiert aus langjährigen Messungen von Wetterdaten und Beobachtungen auf der Nordhalbkugel. Die Luft wird hierbei als absolut trockenes Gas angesehen, was einer relativen Luftfeuchte von 0 % entspricht. Weitere Referenzwerte können Tabelle 2 entnommen werden. (DWD, 2017. Aufgerufen von https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/begriffe/S/Standardatmosphaere_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=3).

Die ISA stellt einen Versuch dar, das komplexe und höchst dynamische System der Erdatmosphäre in einer Art langjährigem Mittel abzubilden. Um reale Daten über den jeweiligen Zustand der einzelnen Luftschichten zu erhalten, sind jedoch im Normalfall

tagesaktuelle Messungen erforderlich, welche auf verschiedensten Methoden der Nah- und Fernerkundung basieren. Neben einer Vielzahl von optischen Verfahren, wie beispielsweise Lidar-Messungen von Wolkenhöhen oder Windgeschwindigkeiten, kommen zur Untersuchung der atmosphärischen Parameter nach wie vor Wetterballons zum Einsatz. Diese führen direkt vor Ort, Messungen insbesondere in den erdnahen und das Wetter bestimmenden Schichten durch.

Die genauen Messungen der letzten Jahrzehnte haben, gemeinsam mit einer beständigen Weiterentwicklung von geeigneten numerischen Modellen und immer größer werdender Rechenleistung zu einem immer tieferen Einblick in die aus dem Weltall sehr dünn und zerbrechlich scheinende Lebensschicht unserer Erde gegeben. Die menschlichen Einflüsse auf den Energiehaushalt der Erde und der Atmosphäre sind mittlerweile in der Fachwelt unbestritten – so liest man beispielsweise im fünften Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) von 2013:

„Der menschliche Einfluss wurde in der Erwärmung der Atmosphäre und des Ozeans, in Veränderungen des globalen Wasserkreislaufs, in der Abnahme von Schnee und Eis, im Anstieg des mittleren globalen Meeresspiegels und in Veränderungen einiger Klimaextreme erkannt […] Es ist äußerst wahrscheinlich, dass der menschliche Einfluss die Hauptursache der beobachteten Erwärmung seit Mitte des 20. Jahrhunderts war.“

Es erscheint als die wohl größte Herausforderung des 21. Jahrhunderts, den mit der globalen Erwärmung einhergehenden Veränderungen zu begegnen. Ein entscheidender Faktor hierzu ist mit Sicherheit die Bildung: Aus ihr gehen nicht nur die wissenschaftlichen Hoffnungsträger hervor, welche Strategien entwickeln könnten, mit der veränderten Situation umzugehen und sie, wo irgend möglich, zu mildern. Sie ist auch eine Grundvoraussetzung für rationales und aufgeklärtes Verhalten, welches erforderlich ist, um Leugnern unbequemer Wahrheiten und den Erfindern „alternativer Fakten“ mit guten Argumenten entgegenzutreten.

3.2. Die Physik des Stratosphärenballons

Eine entscheidende Variable zur Beschreibung und auch zur Vorherberechnung des Ballonflugs ist die Aufstiegsgeschwindigkeit. Nach den vorhergehenden Betrachtungen zum insgesamt recht inhomogenen Aufbau der Atmosphäre erscheint es zunächst wenig intuitiv eine konstante Steigrate anzunehmen.

Nimmt man einen ideal elastischen Ballon als Grundvoraussetzung an, kann mit relativ einfachen mathematischen Werkzeugen die Steigrate aus einigen wenigen Grundannahmen abgeleitet werden.

Das Konzept der folgenden Berechnungen wird auf einem Kräftegleichgewicht zwischen Auftriebskraft und Luftwiderstandskraft begründet und mittels eines iterativen Verfahrens auf alle Höhenbereiche erweitert.

Eine Formel für die Auftriebskraft lässt sich aus dem archimedischen Prinzip bestimmen:

$$F_{Auftrieb} = (\rho_{Luft}(h) - \rho_{Helium}(h)) \cdot V(h) \cdot g - m_{ges} \cdot g$$

Zur Berechnung der Auftriebskraft benötigt man somit die Dichte ρ von Luft beziehungsweise dem Füllgas (Helium) in Abhängigkeit der Höhe h, das Volumen V des Ballons (auch dieses ist durch den variierenden Druck höhenabhängig!) sowie die Masse m des gesamten Ballongespanns (abzüglich der darin enthaltenen Heliummasse), im fortfolgenden Text als Masse m_{ges} bezeichnet.

Die Masse m_{ges} beinhaltet neben der angehängten Nutzlast unter anderem auch die Masse des ungefüllten Ballons sowie des Fallschirms und der Verbindungselemente zwischen Ballon und Nutzlast und kann somit leicht beeinflusst werden.

Die Schwerebeschleunigung g ändert sich bis zu einer Höhe von 30km kaum und kann somit näherungsweise konstant auf $g = 9{,}81\ \frac{m}{s^2}$ gesetzt werden.

Im Folgenden wird angenommen, dass der Druck, der bei der Volumenvergrößerung des Ballons durch die Hülle entsteht, vernachlässigbar klein ist. Der Druck im Ballon entspricht damit in etwa dem höhenabhängigen Atmosphärendruck. Eine Formel für das Volumen des Ballons lässt sich aus dem allgemeinen Gasgesetz ableiten und ergibt sich zu:

$$V(h) = \frac{V_{Start} \cdot \rho_{Helium}(0km)}{M_{Helium}} \cdot \frac{R \cdot T(h)}{p(h)}$$

wobei $p(h)$ der Atmosphärendruck in Abhängigkeit der Höhe, $T(h)$ die höhenabhängige Temperatur, M_{Helium} die molare Masse von Helium und R die universelle Gaskonstante bezeichnet. Das Startvolumen V_{Start} kann durch die Heliumfüllmenge beziehungsweise durch Auswahl einer geeigneten Ballongröße verändert werden.

Laut der internationalen Standardatmosphäre, ISA (vgl. 3.1.4), kann der Temperaturverlauf für verschiedene Höhenbereiche der unteren Atmosphäre als nahezu linear angenommen werden. Es ergibt sich somit:

$$T(h) = T_{h_{min}} + a \cdot (h - h_{min}),$$

wobei a der Temperaturgradient des jeweiligen Höhenbereichs und h_{min} die minimale Höhe der jeweiligen Atmosphärenschicht ist. Zwischen 0 und 11 km ($h_{min} = 0\,km$, $T_{h_{min}} = 288{,}15K$) beträgt der Temperaturgradient a = - 6,5 $\frac{K}{km}$ (abgeleitet aus den Daten der ISA), zwischen 11km und 20km ($h_{min} = 11\text{ km}$) ist die Temperatur nahezu konstant bei $T =$ 216,65 K und zwischen 20km und 30km ($h_{min} = 20\text{ km}$) beträgt a = + 1 $\frac{K}{km}$. Der Zusammenhang zwischen Temperatur und Höhe ist im folgenden Diagramm (Abbildung 15) abgebildet.

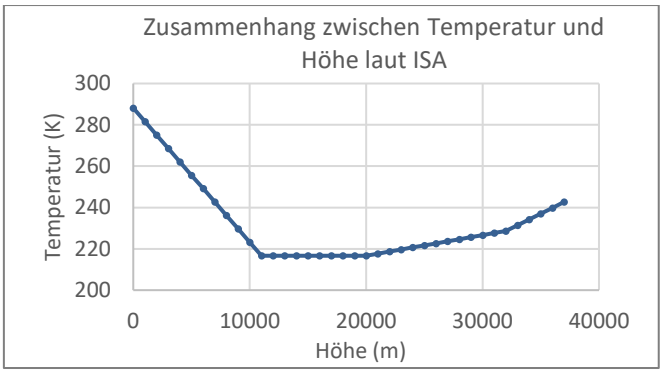


Abbildung 15: Zusammenhang zwischen Temperatur und Höhe.

Mithilfe der hydrostatischen Grundgleichung und dem oben angegebenen Zusammenhang zwischen Temperatur und Höhe, kann auch der Zusammenhang zwischen Druck und Höhe ermittelt werden. Dieser ist grafisch im nachfolgenden Diagramm (Abbildung 17) dargestellt.

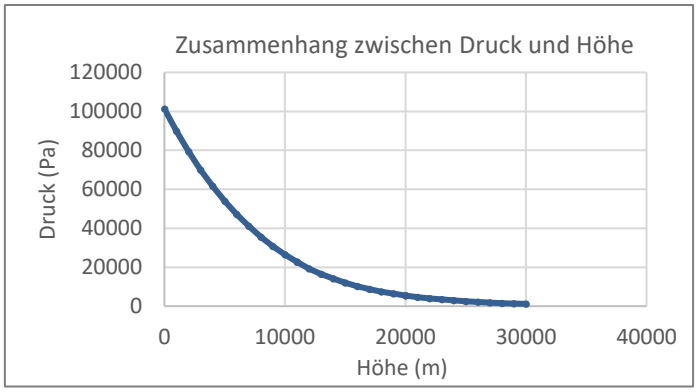


Abbildung 16: Zusammenhang zwischen Druck und Höhe.

Wie man sieht, nimmt der Druck exponentiell mit der Höhe ab. Dieser als barometrische Höhenformel bekannte Zusammenhang führt, je nachdem ob die Temperatur in der Höhe konstant ist oder nicht, zu zwei unterschiedliche Formeln:

$$p(h) = p(h_{min}) \cdot e^{-\frac{M_{Luft}\, g}{RT}(h-h_{min})} \quad \text{(T = konstant)}$$

bzw.

$$p(h) = p(h_{min}) \cdot e^{-\frac{M_{Luft}\, g}{Ra}\ln\left(1+\frac{a(h-h_{min})}{T(h_{min})}\right)} \quad \text{(T nicht konstant[4])}$$

Aus dem Druck lässt sich mithilfe der allgemeinen Gasgleichung die Dichte in Abhängigkeit der Höhe ermitteln. Man erhält

$$\rho_{Luft}(h) = \frac{p(h) \cdot M_{Luft}}{R \cdot T(h)}$$

und

$$\rho_{Helium}(h) = \frac{p(h) \cdot M_{Helium}}{R \cdot T(h)}$$

Damit sind alle zur Berechnung des Ballonvolumens benötigten Werte auf die momentane Höhe und das (variable) Startvolumen des Ballons zurückgeführt. Daraus lässt sich nun die Auftriebskraft $F_{Auftrieb} = (\rho_{Luft}(h) - \rho_{Helium}(h)) \cdot V(h) \cdot g - m_{ges} \cdot g$ in Abhängigkeit von der Höhe bestimmen, wobei die Masse des Gespanns m_{ges} und das Startvolumen V_{Start} die freien Variablen darstellen.

Nachdem die erste Kraftkomponente des Gleichgewichts verstanden ist, widmen wir uns nun der Widerstandskraft.

Die Formel für die Luftwiderstandskraft ist

$$F_{Widerstand} = 1/2 \cdot v^2 \cdot c_w \cdot \rho_{Luft}(h) \cdot A$$

[4] Herleitung siehe Anhang.

Bevor wir die beiden Kräfte gleichsetzen und nach v auflösen, betrachten wir zuerst die Bestandteile der Formel für den Widerstand. Die Dichte wurde bereits im vorhergehenden Abschnitt bestimmt; v somit auch v^2 ist das Ziel der Rechnungen und die Fläche A lässt sich aus dem Volumen des Ballons bestimmen. Hierzu nehmen wir diesen als kugelförmig an.
Der Widerstandsbeiwert c_w eines Körpers ist ein Maß für dessen „Windschlüpfrigkeit". In den meisten Fällen wird er als konstant angenommen.
Im vorliegenden Fall eines Ballonaufstiegs ist diese Annahme jedoch zu hinterfragen: Bezogen auf die Größe des Ballons ist die Strömungsgeschwindigkeit beim Ballonaufstieg in einem kritischen Bereich. In diesem Geschwindigkeitsbereich findet typischerweise ein Umschlagen der zuvor laminaren in eine mehr und mehr turbulente Strömung statt. Dies ist mit einer starken Abnahme des Luftwiderstandsbeiwertes auf weniger als die Hälfte verbunden (vgl. Abbildung 17). Die detaillierten Zusammenhänge sind komplex, weshalb hier nur auf die Konsequenzen für Ballonaufstiege eingegangen werden kann. Bei Frohlich (1984) finden sich detaillierte Betrachtungen zu diesem Phänomen am Beispiel des Baseballspiels.

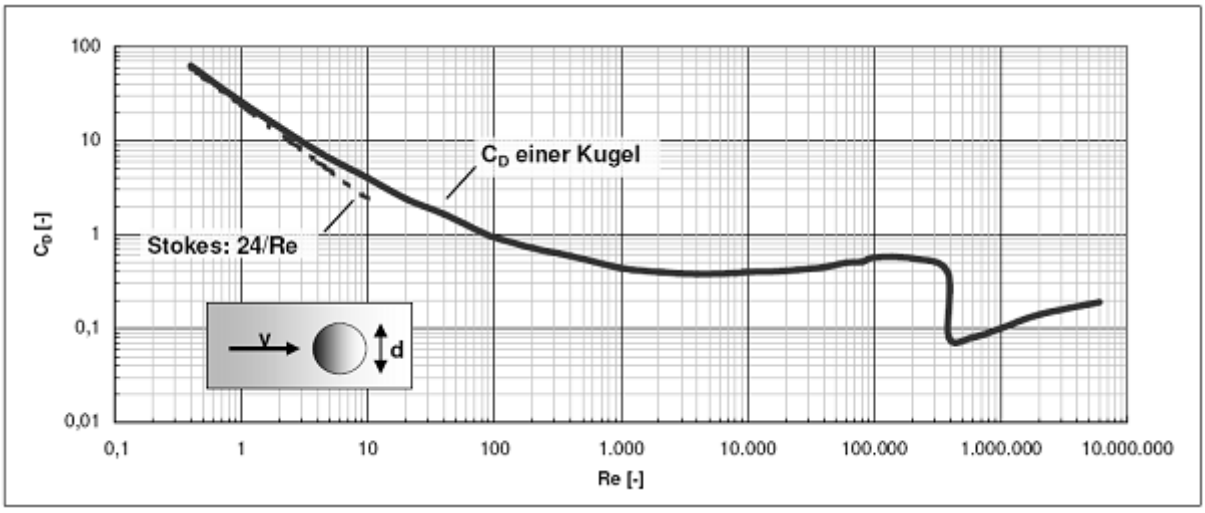


Abbildung 17: Widerstandsbeiwert einer Kugel in Abhängigkeit von der Reynoldszahl (Wikipedia, 2016. Abgerufen von https://de.wikipedia.org/wiki/Str%C3%B6mungswiderstand).

Für eine Kugel kann der Luftwiderstandsbeiwert in Abhängigkeit der so genannten Reynoldszahl[5] Re angegeben werden: Ist $10^3 < Re < 1{,}7 \cdot 10^5$, so ist $c_w \approx 0{,}45$. Ist $Re > 4{,}1 \cdot 10^5$, dann gilt $c_w \approx 0{,}15$. Im Bereich $1{,}7 \cdot 10^5 < Re < 4{,}1 \cdot 10^5$ findet der Strömungsumschlag statt und der Luftwiderstand sinkt rapide ab.

[5] Die Reynoldszahl ist eine dimensionslose Größe, welche die Verhältnisse zwischen den mikroskopischen Größen eines Fluids und dem davon umströmten Medium berücksichtigt.

Stratosphärenballons haben typischerweise Durchmesser von etwa $d \approx 1{,}5\ \mathrm{m}$ und steigen mit ca. $v \approx 5\ \mathrm{m/s}$. Die Reynoldszahl berechnet sich zu

$$Re = \frac{v \cdot d \cdot \rho_{Luft}(h)}{\eta} \approx 5 \cdot 10^5.$$

wobei $\eta = 17{,}1 \cdot 10^{-6} Pa \cdot s$ die Viskosität der Luft bei einer Temperatur von 273 K ist. Es wird deutlich, dass bereits bei einer nur wenig geringeren Aufstiegsgeschwindigkeit von 4 m/s der für den Strömungsumschlag kritische Bereich um $Re < 4{,}1 \cdot 10^5$ erreicht ist. Dies geht mit einem deutlich höheren Luftwiderstand einher, woraus eine noch geringere Aufstiegsgeschwindigkeit resultiert.

Nun nimmt mit zunehmender Höhe die Luftdichte ab. Gleiches gilt bis zu ca. 10km Höhe indirekt auch für deren Viskosität, da diese temperaturabhängig ist:

$$\eta(T(h)) = \sqrt{\frac{T(h)}{273K}} \cdot \eta(273K).$$

Zusammengefasst bedeutet dies, dass sich die Reynoldszahl und damit auch der Luftwiderstandsbeiwert während des Ballonaufstiegs in nicht-trivialer Art und Weise ändern. Dies führt dazu, dass der auf den ersten Blick recht einfach Ansatz eines Kräftegleichgewichts von Luftwiderstand und Auftriebskraft bei genauerer Betrachtung zu einer recht komplexen Rechnung führt. Die Luftwiderstandskraft $F_{Widerstand} = 1/2 \cdot v^2 \cdot c_w \cdot \rho_{Luft}(h) \cdot A$ kann nicht einfach nach der Geschwindigkeit *v* aufgelöst werden, da auch der Widerstandsbeiwert c_w geschwindigkeitsabhängig ist!

Diese „Problematik“ kann durch ein iteratives Verfahren gelöst werden: Man nimmt eine Startgeschwindigkeit v_0 an, z.B. $3\frac{m}{s}$ und setzt diese in die Formel für die Reynoldszahl ein. So ergibt sich aus Abbildung 17 einen Startwert für c_w. Diesen setzt man gemeinsam mit der Starthöhe, z.B. $h_0 = 500\ \mathrm{m}$, ein in

$$F_{Widerstand} = F_{Auftrieb}$$

$$1/2 \cdot v^2 \cdot c_w \cdot \rho_{Luft}(h) \cdot A = (\rho_{Luft}(h) - \rho_{Helium}(h)) \cdot V(h) \cdot g - m_{ges} \cdot g$$

und löst die Gleichung nach v auf. Die somit erhaltene Geschwindigkeit liefert zum einen den Widerstandsbeiwert für den nächsten Iterationsschritt und zum anderen - über ein kurzes für die Iteration festgelegtes Zeitintervall - auch die nächste einzusetzende Höhe nach $\Delta s = v \cdot \Delta t$. Dieses Prinzip ergibt iterativ einen Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Höhe, wobei erstere insbesondere durch das Startvolumen und die Gesamtmasse beeinflusst werden kann.

Die oben beschriebenen Berechnungen liefern im Allgemeinen keine konstante Steigrate. Bei realen Messungen werden entsprechend auch Schwankungen in der Aufstiegsgeschwindigkeit um etwa 50% beobachtet. Da jedoch die Geschwindigkeiten um $5\,\mathrm{m/s}$ im Vergleich zu typischen Windgeschwindigkeiten von 10 bis über 100 m/s in großen Höhen eher klein sind, fallen diese Schwankungen bei der Vorhersage des Flugpfades im Normalfall nicht sonderlich ins Gewicht. Eine intensivere Auseinandersetzung mit der Problematik „Steigrate“ erscheint vor diesem Hintergrund etwas akademisch, zeigt aber an einem motivierenden Beispiel sehr deutlich, wie komplex scheinbar einfache und vielfach schon vereinfacht beschriebene physikalische Probleme bei einer genaueren Betrachtung werden können.

Anhang

I. Die barometrische Höhenformel

Aus der hydrostatischen Grundgleichung

$$\frac{dp}{dh} = -\rho \cdot g$$

welche den Schweredruck p in einem Fluid in Abhängigkeit von der Höhe h und der Dichte ρ des Fluids beschreibt, erhält man nach dem idealen Gasgesetz $\rho = \frac{p \cdot M}{R \cdot T}$:

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

Dabei ist M die mittlere molare Masse des Fluids (hier der Luft!), g die Schwerebeschleunigung, R die universelle Gaskonstante und T die absolute Temperatur. Durch Separation der Variablen wird dies zu:

$$\int_{p(h_{min})}^{p(h_1)} \frac{dp}{p} = -\int_{h_{min}}^{h_1} \frac{Mg}{RT} dh$$

Die Integration der linken Seite ergibt $ln\left(\frac{p(h_1)}{p(h_{min})}\right)$. Das Integral auf der rechten Seite nimmt jedoch unterschiedliche Werte an, je nachdem, ob T als höhenabhängig angesehen wird oder nicht. Für nicht allzu große Höhen kann hingegen g als konstant angenommen werden.

I.1. Konstante Temperatur

Unter der Annahme einer konstanten Temperatur können die Integrale auf beiden Seiten leicht gelöst werden:

$$\int_{p(h_{min})}^{p(h_1)} \frac{dp}{p} = -\frac{Mg}{RT} \int_{h_{min}}^{h_1} dh$$

$$\Leftrightarrow ln\left(\frac{p(h_1)}{p(h_{min})}\right) = -\frac{Mg}{RT}(h_1 - h_{min})$$

$$\Leftrightarrow \frac{p(h_1)}{p(h_{min})} = e^{-\frac{Mg}{RT}(h_1 - h_{min})}$$

$$\Leftrightarrow p(h_1) = p(h_{min}) e^{-\frac{Mg}{RT}(h_1 - h_{min})}$$

Oder kurz: $$p(h) = p_0 e^{-\frac{Mg}{RT}(h - h_0)}$$

I.2. Veränderliche Temperatur

In bestimmten Höhenbereichen ändert sich jedoch die Temperatur mit der Höhe. Im Folgenden soll von einer linearen Änderung ausgegangen werden:

$$T(h) = T_{h_{min}} + a \cdot (h - h_{min}) = T_{h_{min}} \left(1 + \frac{a \cdot (h - h_{min})}{T_{h_{min}}}\right)$$

Dabei ist *a* der Temperaturgradient für die jeweilige Atmosphärenschicht.

$$-\int_{h_{min}}^{h_1} \frac{Mg}{RT} dh = -\int_{h_{min}}^{h_1} \frac{Mg}{R\left(T_{h_{min}} + a \cdot (h - h_{min})\right)} dh = -\frac{Mg}{R} \int_{h_{min}}^{h_1} \frac{1}{(T_{h_{min}} - ah_{min}) + ah} dh$$

Mit $\int \frac{1}{ax+b} = \frac{1}{a} \ln(ax + b)$ wird das Integral zu

$$\frac{1}{a} ln\left((T_{h_{\min}} - ah_{min}) + ah\right)\Big|_{h_{min}}^{h_1} = \frac{1}{a} ln\left(\frac{(T_{h_{\min}} - ah_{min}) + ah_1}{T_{h_{\min}}}\right) =$$

$$= \frac{1}{a} ln\left(\frac{T_{h_{\min}} + a(h_1 - h_{min})}{T_{h_{\min}}}\right)$$

Und schließlich

$$ln\left(\frac{p(h_1)}{p(h_{min})}\right) = -\frac{Mg}{R}\frac{1}{a} ln\left(\frac{T_{h_{\min}} + a(h_1 - h_{min})}{T_{h_{\min}}}\right) = -\frac{Mg}{R}\frac{1}{a} ln\left(1 + \frac{a\Delta h}{T_{h_{\min}}}\right)$$

$$p(h_1) = p(h_{min}) e^{-\frac{Mg}{Ra} ln\left(1 + \frac{a\Delta h}{T_{h_{\min}}}\right)}$$

Dies lässt sich mit $e^{ylnx} = x^y$ noch weiter auflösen zu:

$$p(h) = p_0 \left(1 + \frac{a\Delta h}{T_{h_{\min}}}\right)^{-\frac{Mg}{Ra}}$$

der barometrischen Höhenformel für einen linearen Temperaturverlauf.

II. Rechtliche Grundlagen für HAB-Missionen

Alle Vorschriften, die beim Betrieb des Ballonsystems zu beachten sind, regelt die „DURCHFÜHRUNGSVERORDNUNG (EU) Nr. 923/2012“ – hier ist speziell der Unterpunkt „SERA.3140 Unbemannte Freiballone“ zu beachten, welcher auf Anlage 2 "Unbemannte Freiballone" verweist. Dort sind alle rechtlichen Bestimmungen aufgelistet. Eine Zusammenfassung aller relevanten Aspekte und neuere Bestimmungen findet man in NACHRICHTEN FÜR LUFTFAHRER, 2-285-16.

Wie beschrieben, kann ein Stratosphärenballon, je nach Größe und Masse, Nutzlasten in Höhe von über 30 Kilometer bringen. Das ist etwa zweieinhalb Mal so hoch wie die Flughöhe eines Passagierflugzeugs. Der Stratosphärenballon zählt zu den unbemannten Luftfahrtsystemen und bedarf daher einer genauen Absicherung hinsichtlich Genehmigung und Versicherung. Die in diesem Leitfaden beschriebenen Systeme sind unbemannte Freiballons der Klasse „Leicht“.

Zunächst einmal muss eine Genehmigung für den Start beim Grundstückseigner eingeholt und sichergestellt werden, dass mindestens ein Teilnehmer des Starts 16 Jahre oder älter ist. *„Des Weiteren dürfen Personen, die das 16. Lebensjahr noch nicht vollendet haben, nur mit Zustimmung der Erziehungsberechtigten und nur unter deren Aufsicht oder unter der Aufsicht einer von den Erziehungsberechtigten bestimmten Person, die das 16. Lebensjahr vollendet hat, oder einer hierzu aufgrund ihrer Funktion befugten Person (z. B. Lehrer, Erzieher, Ausbilder) von dieser Erlaubnis Gebrauch machen.“* (Regierung von Oberbayern, 2016). Zudem ist zu beachten, dass bei einem Start innerhalb einer geschlossenen Ortschaft 24 Stunden zuvor die örtliche Polizeidienststelle informiert werden sollte. Befindet sich das Aufstiegsgelände innerhalb eines Naturschutzgebietes, so ist die Naturschutzbehörde rechtzeitig zu informieren. Es muss gewährleistet sein, dass die öffentliche Ordnung und Sicherheit sowie Personen und landwirtschaftliche Nutztiere nicht gefährdet und gestört werden. Darüber hinaus ist auf weiteren Flugverkehr zu achten, insbesondere in der Nähe von Flughäfen.

Zwei Wochen vor dem geplanten Start muss eine schriftliche Genehmigung beim Luftamt eingeholt werden, wobei folgende Angaben gemacht werden müssen:

- Name
- Datum und Uhrzeit des Starts
- Aufstiegsort (anzugeben als Koordinaten in Grad, Minuten und Sekunden, jeweils für Nord und Ost)
- Dauer des Fluges
- Bezeichnung des unbemannten Flugfahrtsystems (Art des Ballons)
- Kein Paket über 3kg

- Kein Paket mit einer Flächendichte über 13g/cm^2
  und gleichzeitig Masse größer/gleich 2kg
- Gesamtmasse des Gespanns unter 4 Kilogramm
- Bruchlast der Verbindung zwischen Sonde und Ballon geringer als 230 N
- Ersatztermin, falls der geplante Start nicht stattfinden kann
- Einhaltung der rechtlichen Rahmenbedingungen (Versicherung)

Die Kosten für die Genehmigung belaufen sich derzeit auf 40,00 €.

Für den Ballonaufstieg muss eine Haftpflichtversicherung abgeschlossen werden, da eine Privathaftpflichtversicherung hier nicht greift. Eine solche kann bei einem Versicherungsmakler angefragt werden. Die Kosten belaufen sich hierbei auf ca. 50,00 €. Die folgenden Angaben müssen an die Versicherung übermittelt werden:

- Name
- Datum und Uhrzeit des Starts
- Aufstiegsort
- Dauer des Fluges
- Bezeichnung des unbemannten Flugfahrtsystems (Art des Ballons)
- Gesamtmasse des Gespanns (System: „leicht“, wenn unter 4 Kilogramm)
- Ersatztermin, falls der geplante Start nicht stattfinden kann

Des Weiteren ist zu beachten, dass Freiballons nur bei einer horizontalen Sicht von mindestens 5 km und einer Wolkenbedeckung von höchstens 4 Achtel gestartet werden dürfen. Die Einhaltung der rechtlichen Verordnungen soll eine Gefährdung von Personen oder Gegenständen möglichst ausschließen. Am Ende wird jedoch jeder Ballonstarter für sich selbst entscheiden müssen, ob er oder sie bereit ist, das nicht auszuschließende Restrisiko, welches bei einer solchen Mission immer besteht, in Kauf zu nehmen. In Deutschland nehmen Siedlungs- und Verkehrsflächen einen Anteil von etwa 14% ein (vgl. Abbildung 19). Es ist also nicht unwahrscheinlich, dass die Nutzlast in besiedeltem Gebiet landet. In diesem Zusammenhang sei nochmals auf die vorgeschriebene Verwendung eines Fallschirms hingewiesen! Auch das Material der Sonde (am besten Styropor) kann zur Gefahrenminimierung beitragen.

Die Autoren dieses Leitfadens weisen ausdrücklich darauf hin, dass eine Haftung unsererseits für mögliche Schäden ausgeschlossen ist. Im Zweifelsfall sollten sich an einer HAB-Mission Interessierte weitere Beratung, beispielsweise durch die Deutsche Flugsicherung, DFS, einholen oder, wenn die Unsicherheit zu groß ist, auf die Durchführung einer eigenen Mission verzichten. Auf der anderen Seite besteht jedoch über die Hälfte der Fläche Deutschlands aus landwirtschaftlicher Nutzfläche und etwa ein Drittel ist bewaldet. Es ist also sehr viel wahrscheinlicher, sich bei der Bergung mit einer Baumlandung konfrontiert zu sehen, als dass die Sonde auf einer Besiedelungsfläche landet.

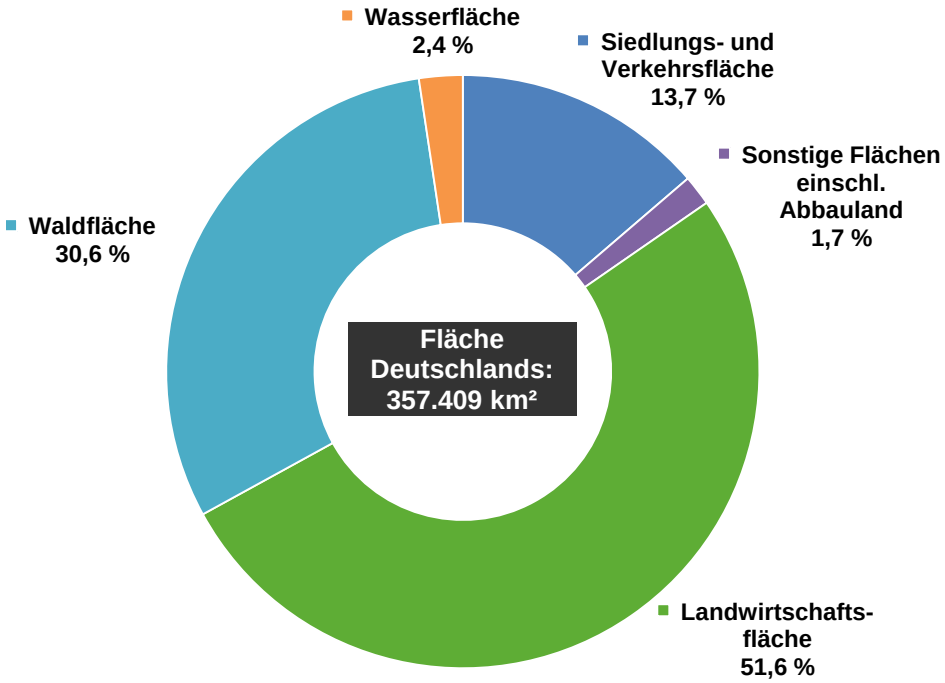


Abbildung 18: Flächennutzung in Deutschland (Statistisches Bundesamt (Destatis), 2016. Abgerufen von http://www.umweltbundesamt.de/daten/flaechennutzung/struktur-der-flaechennutzung#textpart-1).

III. Checklisten für Stratosphärenballon-Missionen

Mind. 6 Wochen vor dem Start

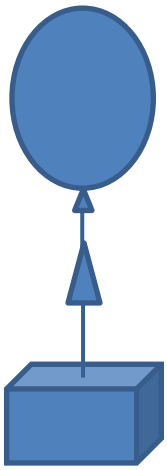
- ☐ Planung der Sonde und ihrer Nutzlast
- ☐ Bestellung von evtl. zusätzlich benötigtem Material und Technik

Mind. 4 Wochen vor dem Start

- ☐ Konstruktion der Nutzlast
- ☐ Konstruktion der Sonde
- ☐ Kontrollieren, ob das Gesamtgewicht 4kg nicht überschreitet
- ☐ Guthaben der SIM Karte aufladen, GPS-Tracker einstellen und Tests durchführen
- ☐ Startort auswählen und ggf. eine Genehmigung des Grundstückseigentümers einholen

Mind. 3 Wochen vor dem Start

- ☐ Aufstiegserlaubnis bei der Landesluftfahrtbehörde (und evtl. umliegenden Flughäfen) einholen
- ☐ Luftfahrt-Halterpflichtversicherung abschließen



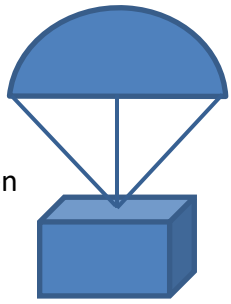
Ca. 24 Stunden vor dem Start

- ☐ Wetterbericht prüfen
- ☐ Anhand des Abfluggewichts der Sonde die benötigte Heliummenge berechnen
- ☐ Flugroute vorausberechnen (z.B. mit predict.hubhub.org) und gegebenenfalls durch Variation der Ballongröße beeinflussen
- ☐ Akkus laden und SD-Karten formatieren
- ☐ Abschlusstest der Technik

Am Flugtag

- ☐ GPS-Tracker einschalten und final testen
- ☐ Schnüre (Reißfestigkeit < 230N) zurechtschneiden und festknoten: Mindestens 10 m Schnur oben an den Fallschirm knoten, 10m Schnur unten an den Fallschirm knoten

- Wetterballon mit berechneter Heliummenge füllen: Einen Druckminderer verwenden und über das Gewicht, das vom Ballon getragen werden kann, abschätzen, wie viel Helium sich im Ballon befindet
- Nutzlastelemente in die Sonde einsetzen und fixieren
- GPS-Tracker in die Sonde einsetzen und die richtige Ausrichtung der Antenne prüfen
- Anbringung von Kontaktdaten an und in der Sonde
- Sonde mit Gaffa Tape verschließen
- Sonde mit Fallschirm verbinden
- ggf. Flugsicherung telefonisch über tatsächliche Startzeit informieren



<u>Ca. 3 Stunden nach dem Start</u>

- Ortung mithilfe der GPS Geräte
- Bergung der Sonde

IV. Bezugsquellen und hilfreiche Links

- Shop für alle Komponenten des Ballonflugs: https://www.stratoflights.com
- Shop für Fallschirme: http://www.raketenmodellbau-klima.de
- Helium und Ballongas: http://www.linde.de
- Schweizer Ballonladen: http://www.meteolabor.info
- DWD – Wetterlexikon:
  http://www.dwd.de/DE/service/lexikon/lexikon_node.html
- Ausführliche, verständliche Beschreibung der Erdatmosphäre und ihrer einzelnen Schichten:
  http://www.atmos.physik.uni-wuppertal.de/atmosphaere/der-aufbau.html
- Wetterballon Tutorialvideos und Shop:
  https://www.stratoflights.com
- Daten von aktuellen Radiosondenmessungen:
  - Wetterzentrale: http://www.wetterzentrale.de/topkarten/tkbeote.html
  - Wetteronline: http://www.wetteronline.de/radiosonden
- Flugroutenvorhersage: http://predict.habhub.org/
- Windsysteme der Erde: https://earth.nullschool.net/
- Rechtsvorschriften der EU: http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012R0923

V. Quellen

Barthol,P., Grandorfer, A., Solanki, S.K., Schüssler, M., Charles, B., Curdt, W., … Schmidt,E. (2011). The Sunrise Mission. *Solar Phys*, 268: 1–34, DOI 10.1007/s11207-010-9662-9.

Bundesamt für Statistik (2016). Abgerufen am 06. Juni 2017 von http://www.umweltbundesamt.de/daten/flaechennutzung/struktur-der-flaechennutzung#textpart-1

Cambridge University Space Flight (2010). Abgerufen am 06. Juni 2017 von predict.habhub.org

Deutsche Flugsicherung (2016). *Nachrichten für Luftfahrer*, Nr. 2-285-16.

Deutscher Wetterdienst (2016a). *Radiosondenaufstieg*. Abgerufen am 13.10.2016 von https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?nn=103346&lv2=102134&lv3=102172

Deutscher Wetterdienst (2016b). Abgerufen am 13.10.2016 von http://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html;jsessionid=67550EF4F1238DF06CD4319F91D1CD3F.live21061?lv2=100652&lv3=100744

Deutscher Wetterdienst (2017). *ICAO-Standardatmosphäre (ISA)*. Aufgerufen am 13.06.2017 von https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/begriffe/S/Standardatmosphaere_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=3

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (2015). *Höhenflug für die Forschung – per Ballon in die Stratosphäre*. Abgerufen am 21.06.2016 von http://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10261/371_read-13886#/gallery/19700

DuBois, J. L., Multhauf, R. P. & Ziegler, C. A. (2002). The invention and development of the radiosonde: with a catalog of upper-atmosphere telemetering probes in the National Museum of American History. *Smithsonian Institution*, Vol. 53.

Europäische Kommission (2012): Durchführungsverordnung (EU). *Amtsblatt der Europäischen Union*, Nr.923/2012.

Frohlich, C. (1984). Aerodynamic drag crisis and its possible effect on the flight of baseballs. American Journal of Physics, 52(4), 325-334.

Intergovernmental Panel on Climate Change (2013). Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. In Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex und P.M. Midgley (Hrsg.), *Klimaänderung 2013: Naturwissenschaftliche Grundlagen. Beitrag der Arbeitsgruppe I zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen [].* Cambridge, Großbritannien und New York, USA: Cambridge University Press. Deutsche Übersetzung durch Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Österreichisches Umweltbundesamt, ProClim, Bonn/Wien/Bern 2014.

Klose, B. (2016). *Meteorologie: eine interdisziplinäre Einführung in die Physik der Atmosphäre*. Berlin/Heidelberg, Springer-Verlag.

Regierung Oberbayern (2016). Allgemeine Verfügung der Regierung von Oberbayer, - Luftamt Südbayern – zur Erteilung der Erlaubnis zum Aufstieg von unbemannten Luftfahrtsystemen gemäß § 20 Abs. 1 Nr. 7 Luftverkehrs -Ordnung (LuftVO) in den Regierungsbezirken Oberbayern, Niederbayern und Schwaben des Freistaates Bayern. *Oberbayrisches Amtsblatt,* 20/2016.

Schüttler, T., Zepp, S. & Girwidz, R. (2017). Validierung von NDVI-Messungen mit einer modifizierten Digitalkamera - Fernerkundung von Vegetation als Thema des Physikunterrichts. *PhyDid A-Physik und Didaktik in Schule und Hochschule,* eingereicht.

Shaw, J. A., Nugent, P. W., Kaufman, N. A., Pust, N. J., Mikes, D., Knierim, C., ... & Knighton, W. B. (2012). Multispectral imaging systems on tethered balloons for optical remote sensing education and research. *Journal of Applied Remote Sensing*, 6(1), 063613-063613.

Solomon, S., Ivy, D. J., Kinnison, D., Mills, M. J., Neely, R. R., & Schmidt, A. (2016). Emergence of healing in the Antarctic ozone layer. *Science*, 353(6296), 269-274.

Stratoflights (2017). Abgerufen am 06. Juni 2017 von http://www.stratoflights.com/shop/fallschirm/

University of Wyoming (o.J.). Abgerufen am 06. Juni 2017 von http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html

Wlach, S., Schwarzbach, M., & Laiacker, M. (2015). DLR HABLEG–High Altitude Balloon Launched Experimental Glider. *ESA Communications.* 22nd ESA Symposium on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research, Nr. SP-730, S. 385-392.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Skizze des Ballongespanns. 9
Abbildung 2: Burst Calculator des online Vorhersage Programms (Cambridge University Space Flight, 2010. Aufgerufen von http://predict.habhub.org) 14
Abbildung 3: geöffneter Rundkappenfallschirm (Stratoflights, 2017. Aufgerufen von http://www.stratoflights.com/shop/fallschirm/). 17
Abbildung 4: Drei verschiedene Darstellungsformen einer Landschaft: (1) RGB-echtfarben Bild (2) Infrarotaufnahme mit Farbfilter (3) NDVI-Falschfarbenbild. Das Falschfarbebild dient der Vegetationsanalyse: Gesunde Vegetation ist grün, andere Flächen mehr oder weniger bräunlich dargestellt. 20
Abbildung 5: Schaltplan des „StratoIno“ Datenloggers. Er basiert auf Adafruit Feather boards und Shields und wird in Arduino programmiert. 21
Abbildung 7: Start des Gleiters mit 3 m Spannweite (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), 2015. Abgerufen von http://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10261/371_read-13886/#/gallery/19701). 23
Abbildung 8: Aufnahmesystem für NDVI-Bilder vom Fesselballon aus (Shaw et al., 2012). 24
Abbildung 8: Sunrise kurz vor dem Start. Der Ballon ist am Boden nur zum Teil mit Helium gefüllt, um sich während des Aufstieges bei abnehmendem Druck ausdehnen zu können. Bei einer Höhe von 37km wird der Ballon sich um das 300-fache vergrößert haben. Auch bei dieser Mission verbindet ein Fallschirm den Ballon mit der Sonde. (Barthol et al., 2011). ... 25
Abbildung 9: Flugroute von Sunrise (Barthol et al., 2011). 27
Abbildung 10: Aufbau einer Radiosonde. 28
Abbildung 11: Die Messwerte vieler Radiosondenaufstiege weltweit sind im Netz kostenfrei erhältlich (University of Wyoming, o.J. Aufgerufen von http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html) 30
Abbildung 12: Erdatmosphäre aufgenommen mit einer Mobius Action Cam während dem Ballonaufstieg im März 2017. Die Krümmung der Erde entspricht nicht der wahren Erdkrümmung, sondern entsteht durch die Optik der Kamera. 31
Abbildung 13: Zusammensetzung der Atmosphäre (mit freundlicher Genehmigung von Dr. Martin Schultz, 2016). 32
Abbildung 14: Aufbau der Atmosphäre und Temperaturverlauf (DWD, 2016b). 33
Abbildung 15: Zusammenhang zwischen Temperatur und Höhe. 39
Abbildung 17: Zusammenhang zwischen Druck und Höhe. 40

Abbildung 17: Widerstandsbeiwert einer Kugel in Abhängigkeit von der Reynoldszahl (Wikipedia, 2016. Abgerufen von https://de.wikipedia.org/wiki/Str%C3%B6mungswiderstand). 41
Abbildung 19: Flächennutzung in Deutschland (Statistisches Bundesamt (Destatis), 2016. Abgerufen von http://www.umweltbundesamt.de/daten/flaechennutzung/struktur-der-flaechennutzung#textpart-1). 48

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bezugsquellen für Stratosphärenballon-Komponenten. 8
Tabelle 2: Referenzdaten der ISA. 36

Abkürzungsverzeichnis

DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DWD	Deutscher Wetterdienst
DFS	Deutsche Flugsicherung
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISA	Internationale Standardatmosphäre
HABLEG	High Altitude Balloon Launched Experimental Glider
Lidar	Light detection and ranging: spezielles Lasermessverfahren für Abstands- und Geschwindigkeitsmessungen
NIR	Near Infrared (nahes Infrarot)
NDVI	Normalized Differenced Vegetation Index (normalisierter differenzierter Vegetationsindex)
GPS	Global Positioning System