Einmal Stratosphäre und zurück

Das **IUAS** *(*Institut für Unmanned Aerial Systems) der Hochschule Offenburg kooperiert seit Januar 2012 mit einem Schüler- und Lehrerteam des **Schiller-Gymnasiums Offenburg** an dem fächerübergreifenden Projekt „Schiller in Space“. Das Ziel dieser Zusammenarbeit ist die Unterstützung der Schule bei der Programmierung und messtechnischen Ausrüstung unbemannter, autopilotgesteuerter Leichtflugzeuge zur Erfassung von Wetterdaten sowie Aerosol- und Spurengas-Messungen in der unteren und oberen Atmosphäre.

Um zunächst zu erproben, welche naturwissenschaftlichen Messungen sinnvoll und möglich sind, startete das Schülerteam bisher zwei Flüge mit Mess-Boxen an Heliumballons bis in 31.000m Höhe. Diese erfassten Koordinaten, Druck, Temperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit, Spurengase und Höhenstrahlung. Ferner werden die Flüge zur Unterstützung der Datenauswertung stets mit einer Videokamera aufgezeichnet.

Stratosphären-Aufnahme am 12. 09. 2013 in einer Höhe von 31.000m über Norddeutschland

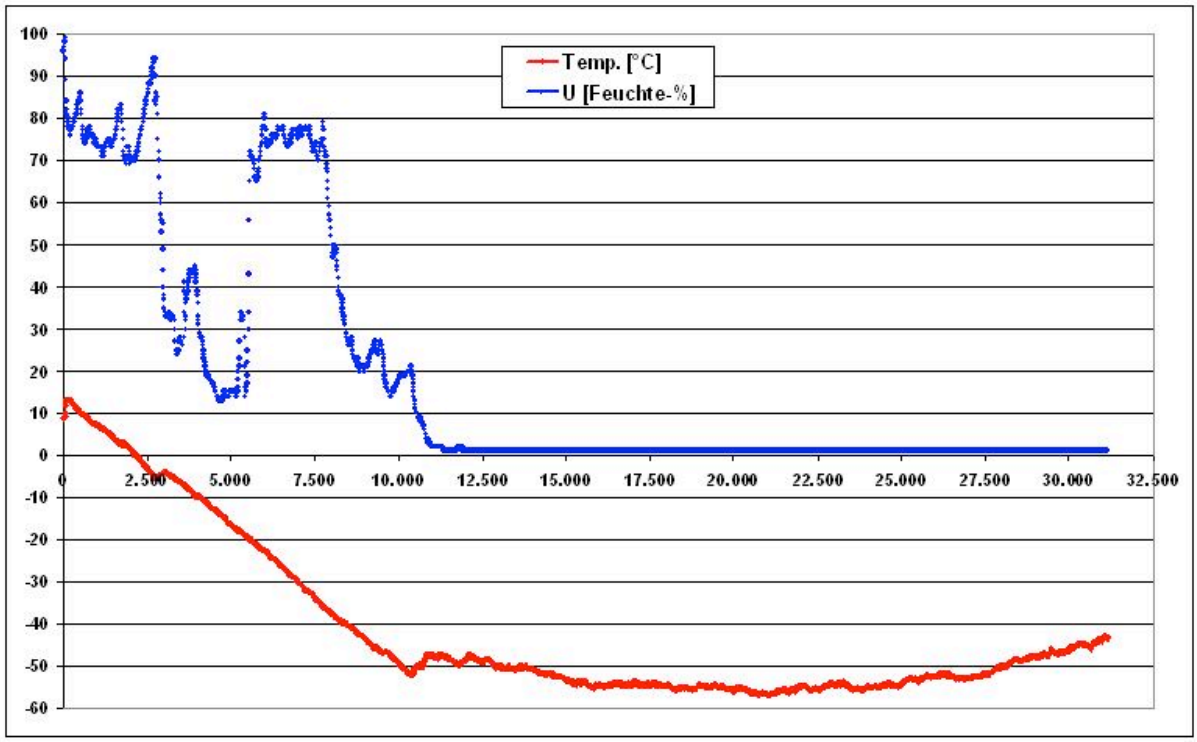
Die Aufstiegszeit der 2.250g Messbox am 5m^3 Heliumballon betrug beinahe 2 Stunden. Der Ballon platzte bei 84-facher Volumenzunahme. Die maximale Absturzgeschwindigkeit betrug 197 km/h und nach 35:22 Minuten erfolgte der Aufschlag mit 18 km/h bei einer Süddrift von 90km.
Die tiefste Temperatur von -56,89°C herrschte in 21.062m Höhe und der Druck fiel in 31.164m Höhe auf 10mbar.

Das Ziel der bisherigen Flüge in 2012 und 2013 war die Bestimmung der Konzentration von Spurengasen, wie Formaldehyd, Ozon und Stickstoffdioxid in der Atmosphäre.

Des weiteren wollten wir die Höhenstrahlung während des Fluges aufzeichnen und schließlich mit den Messdaten der Radiosonde durch Berechnungen verschiedener thermodynamischer Werte die Brunt-Väisälä-Frequenzen ermitteln, um Aussagen über Luftschichtungen anstellen zu können. Der Messflug 2013 fand im beginnenden Herbst statt, also in einer Zeit, in der die planetarische Frontalzone, äußerst turbulent ist. Infolge der abnehmenden Sonneneinstrahlung in den nördlichen Breiten nehmen bis in große Höhen die Druckunterschiede zwischen den Tropen und den Polargebieten vehement zu. Weit in die Stratosphäre reichende Strömungen sind die Folge, die sich wellenartig ausbreiten. Die Videoaufzeichnungen und Messergebnisse zeigen eindrucksvoll die vertikalen und durch die Corioliskraft bedingten horizontalen Drehbewegungen der Luftmassen.

Ein Vergleich der Video- und Messaufzeichnungen des Fluges im Frühsommer *2012*[1] mit dem diesjährigen, *2013*[2], veranschaulicht eindrucksvoll die Weite und Dynamik unserer Atmosphäre mit ihren verborgenen Kräften.

Für die von uns eingesetzten Geräte bzw. Gerätekomponenten gibt es größtenteils keine Betriebserfahrungen unter Stratosphärenbedingungen. So ist jeder Flug diesbezüglich spannend, ob die Systeme ihre Aufgaben unter den extremen Druck- und Temperaturbedingungen, sowie mechanischen Beanspruchungen erfüllen werden.



Die Abbildung zeigt den Verlauf von Luftfeuchtigkeit und Temperatur bis in 31.000m Höhe

[1] http://www.youtube.com/ „Schiller in Space 2012“

[2] http://www.youtube.com/ „Schiller in Space 2013“

Wolken entstehen, wenn die Luftfeuchtigkeit ihren Sättigungspunkt überschreitet. Es kommt zur Kondensation der Wassermoleküle, Wärmeenergie wird frei. In den Höhen der Tropopause und Stratosphäre, bei Temperaturen von -50°C, kann sich der Wasserdampf auch direkt zu Eiskristallen durch Resublimation umwandeln.

Die Videoaufzeichnungen zeigen an diesem Tag haufenförmige Stratosbewölkung bei 2.500m, schichtförmige Altocumulusbänder bei 4.000m, Schwerewellen bei 7.000m sowie leichte Cirrenbewölkung im Bereich der Tropopause.

Mit dem Übergang in die Stratosphäre nimmt die Moleküldichte des Wassers schlagartig ab und ist nun mit unserer Radiosonde nicht mehr messbar. Das heißt aber nicht, dass keine H_2O Moleküle mehr vorhanden sind, denn mit dem Vorhandensein der von uns gemessenen NO_2-Moleküle, entstehen in den Polarregionen die bekannten *PSCs*[3] , auch Perlmuttwolken genannt. Es handelt sich hierbei um salpetersäurehaltige Kristalle $HNO_3 * 3H_2O$[4].

Die Brunt-Väisälä-Frequenz:

Beim Wettergeschehen spielen Vertikalbewegungen der Luftmassen eine wichtige Rolle. In einer stabil geschichteten Atmosphäre liegen die leichteren Luftschichten über den schwereren. Gelangt ein Luftpaket in eine höhere Schicht, ist es umgeben von leichterer bzw. dünnerer Luft. Es ist also schwerer als seine Umgebung und erfährt daher eine Rückstellkraft, die es wieder nach unten treibt. Schießt es über seine ursprüngliche Position nach unten hinaus, befindet es sich umgeben von dichterer Luft. Es ist leichter und wird daher wieder nach oben beschleunigt. Ist diese Auslenkung Δz klein, so ist die rückstellende Kraft proportional zu dieser Auslenkung Δz: $F \sim -\Delta z$.

Vertikalbewegungen in der Atmosphäre können meistens als adiabatische Prozesse angesehen werden. Für die Bestimmung der potentiellen Temperatur Θ eines Luftpakets haben wir mit

$$\Theta = T \cdot \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}}$$ und $$\frac{\kappa - 1}{\kappa} = \frac{c_p / c_v - 1}{c_p / c_v} = \frac{c_p - c_v}{c_p} = \frac{R}{c_p}$$ gerechnet.

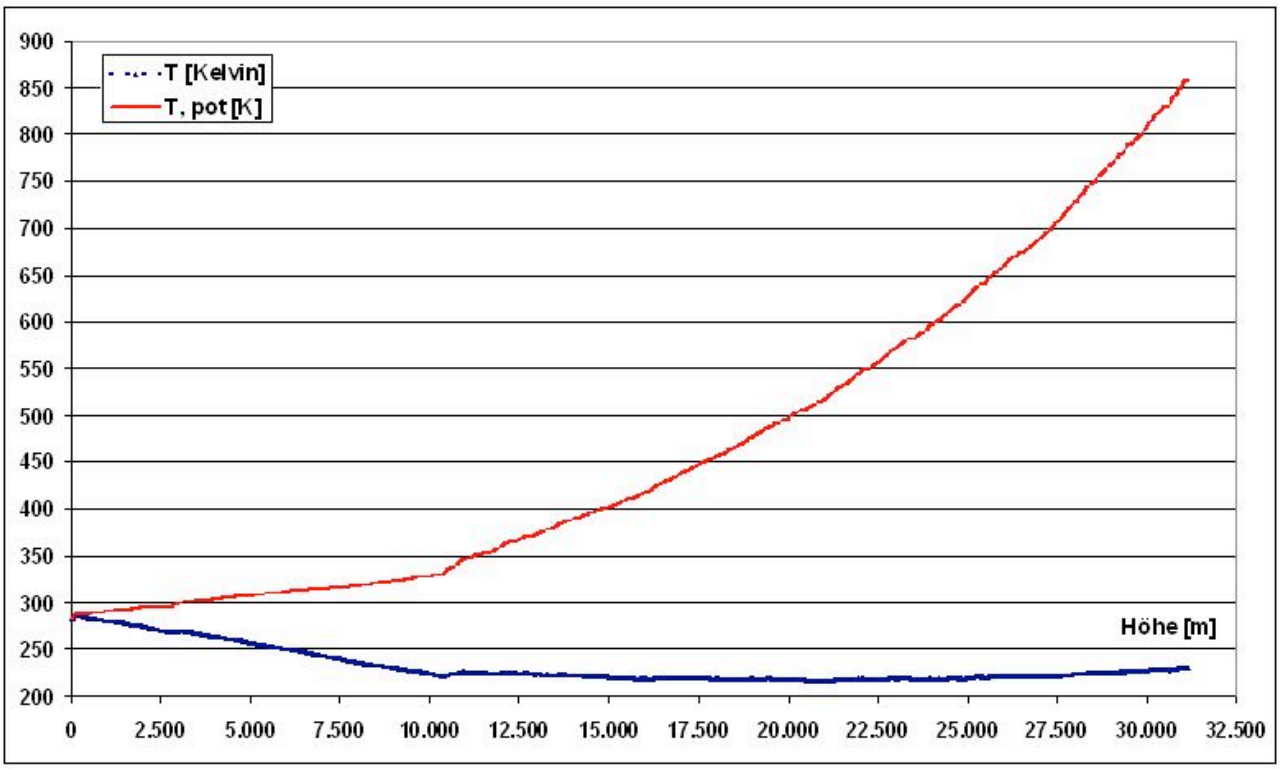
Die potentielle Temperatur Θ eines Luftpaketes ist also die Temperatur, die es annehmen würde, wenn es adiabatisch auf den Atmosphärendruck am Boden, p_0 komprimiert würde.

Unsere Messungen zeigen, dass Θ in der Troposphäre näherungsweise konstant ist, aber in der Stratosphäre steigt Θ mit der Höhe stark an (auf bis zu 900 Kelvin; siehe Graphik).

---

[3] **PSC**, Polar Stratospheric Clouds, „stratosphärische Eiswolken“

[4] **NAT**: Nitric Acid Trihydrate; Salpetersäure-Trihydrat



[273,16 Kelvin entsprechen 0°C]

Die Brunt-Väisälä-Frequenz ***N*** mit der ein Luftpaket schwingt ist somit definiert als:

$$N^2 = \frac{g}{\bar{\rho}} \frac{d\bar{\rho}}{dz}$$

Die Lösungen dieser Gleichung sind somit harmonische Schwingungen mit der Frequenz ***N***:

$\Delta z(t) \quad = \quad \Delta z_0 \cos(N\,t)$.

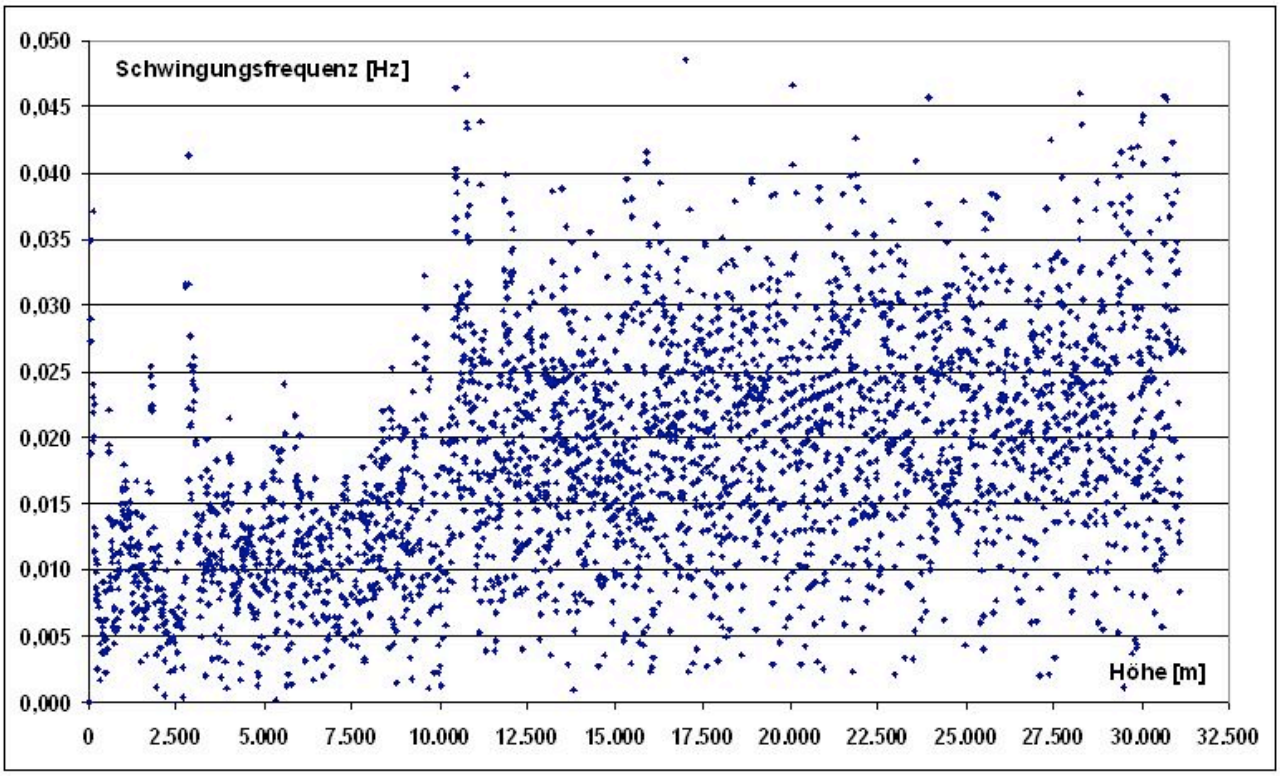
Je stärker die Schichtung ***N*** ausgeprägt ist, desto schneller schwingt das Luftpaket um seine Gleichgewichtslage.

Für $N^2 < 0$ (feuchtlabile Schichtung) erhält man also eine mit der Zeit zunehmende Vertikalgeschwindigkeit, so dass sich ein individuelles Luftvolumen im Sinne einer konvektiven Bewegung immer schneller von seinem Bezugsniveau entfernt, die Atmosphäre ist labil geschichtet.

Bei $N^2 = 0$ bewegt sich das Luftvolumen unbeschleunigt mit seiner Anfangsgeschwindigkeit weiter. Die Schichtung ist neutral und die potentielle Temperatur ist nahezu konstant.

Für $N^2 > 0$ beschreibt die Lösung eine harmonische Oszillation der Vertikalgeschwindigkeit mit der Frequenz N, ein Luftvolumen schwingt folglich um ein Bezugsniveau, die Atmosphäre ist stabil geschichtet.

Bei einer größere Ausdehung in der Horizontalen kann der Einfluss der Erdrotation auf die Vertikalbewegungen nicht mehr vernachlässigt werden. Die Corioliskraft ist dann eine weitere rückstellende Kraft.



Die Abbildung zeigt typische Werte für die Schichtungen im Bereich $N \sim 10^{-2} s^{-1}$

Die Instabilitäten nehmen mit dem Eintritt in die Stratosphäre in 11.000m deutlich zu. Das mit dem Beginn des Herbstes sich vergrößernde Druckgefälle zwischen den Tropen und den Polargebieten konzentriert sich deutlich auf unsere Breiten.

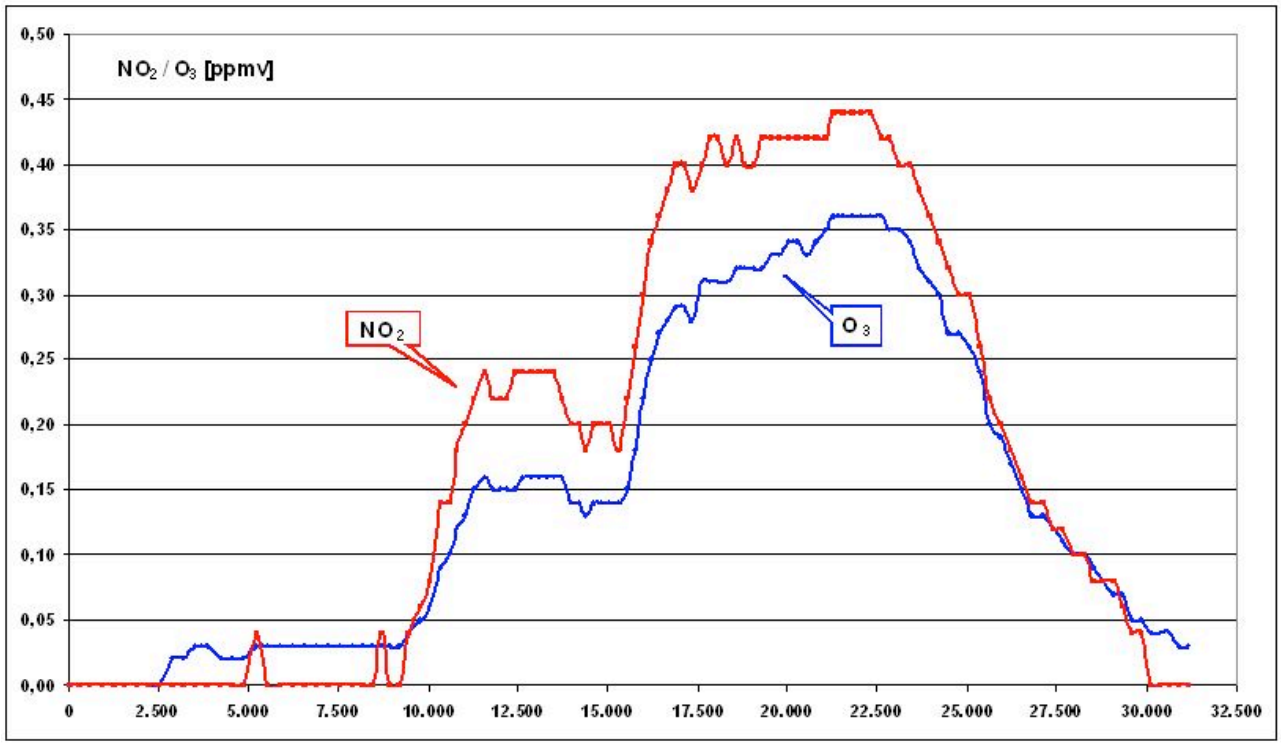
Die Ozon- und Stickstoffdioxid - Konzentrationen

Die Messdiagramme zeigen eindrucksvoll, wie eng der Ozon-Schutzschirm ist und welchen anthropogenen oder natürlichen Angriffen er ausgesetzt ist.
Die Stickstoffdioxid-Werte zeigen in der Troposphäre zwei eng begrenzte Peaks bei ca. 5.000m (Cumuluswolken) und ca. 9.000m (Cirruswolken).

NO und NO_2 sind die wichtigsten Katalysatoren, die das stratosphärische Ozon abbauen. *Paul J. Crutzen*[5] befand als deren Quelle das Lachgas, N_2O, das größtenteils aus mikrobiologischen Abbauprozessen überdüngter Böden stammt. Ferner sind aber auch als Emissionsquelle für N_2O Kraftwerke denkbar, die mit H_2-SCR-Technik *(Selective Catalytic Reduction)* ausgestattet sind.

[5] **Paul J. Crutzen**, niederländischer Meteorologe, 1995 Nobelpreis für Chemie.

Schließlich kann auch NO direkt durch Flugzeugemissionen in die Stratosphäre eingebracht werden. Für NO_x - Auswaschungen in dieser Höhe ist die Luftfeuchte-Gehalt messbar zu gering.



Die Abbildung zeigt die ca. 7.000m starke Ozonschicht, die in 25.000m Höhe abrupt endet

Ozon spielt eine zentrale Rolle in der Stratosphärenchemie. Obwohl es dort nur mit maximal 10 Molekülen pro einer Million Luftmoleküle in den Tropen vorhanden ist, schützt es durch Absorption schädlicher UV-Strahlung biologische Prozesse auf der Erde.
In dieser Höhe finden wir noch eine Moleküldichte der Luft von $3{,}2 * 10^{17}$ n/cm^3. Im Vergleich dazu herrschen am Boden unter Normalbedingungen, NB[6]: $2{,}7 * 10^{19}$ n/cm^3.
Das Flächenintegral der Ozonkurve ergibt 462,36 DU [Dobson Units], d.h. bei einer Luftsäule von 8km Höhe unter NB hat diese Ozonschicht eine Stärke von 4,62mm.

Die Mess-Box-Ausstattung:

GPS-Tracker, Raspberry Pi, Geiger-Müller-Zähler, Dräger-Gasmessgerät mit Pumpe, Steuerung der Spannungsversorgung, GoPro-Videokamera, LiFe-Akku, Väisälä-Radiosonde mit Abroller

Marek Czernohous und Jürgen Vörg

[6] **NB** - Normalbedingungen : p = 1013hPa; T = 273,16K; n = $6{,}023 * 10^{23}$; Molvolumen = 22,4136 L