

# Jugend forscht - Schüler experimentieren

*Landeswettbewerb Einbeck 2023*

*Fachbereich: Geo- und Raumwissenschaften*

## Temperatur- und Luftdruckverlauf beim Flug in die Stratosphäre



*Eingereicht von:*

Max Rückheim  
Len Rüter  
Lasse Schmaljohann

Betreuer:

Thomas Eberhardt  
Cäcilienchule Wilhelmshaven

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Vorwissen und Ziele des Projekts</b> .....	<b>2</b>
<b>2. Betrachtungen zur Atmosphäre und zum Temperaturverlauf in großen Höhen</b> .....	<b>2</b>
<b>3. Missionsvorbereitung und verwendete Sensoren</b> .....	<b>4</b>
<b>4. Unser Flugtag (21.9.2022)</b> .....	<b>5</b>
<b>5. Darstellung und Auswertung unserer Messergebnisse</b> .....	<b>6</b>
5.1. Die Flugkurve unserer beiden Ballons.....	6
5.2. Luftdruckmessung .....	7
5.3. Temperaturmessungen .....	8
5.3.1. Messwerte von Box1 .....	8
5.3.2. Messwerte von Box2 .....	8
5.4. Temperaturgradienten .....	9
5.4.1. Die ersten 500m .....	9
5.4.2. In großer Höhe.....	10
5.4.3. Gesamte Änderungsdaten.....	10
<b>6. Vergleich mit Messdaten des DWD</b> .....	<b>12</b>
6.1. Temperaturmessungen der Radiosonden-Aufstiege .....	12
6.2. Temperaturgradienten der Radiosonden-Messungen.....	13
6.3. Vergleich der Mittelwerte der Radiosonden-Messungen mit unseren Messwerten .....	14
<b>7. Fazit und Ausblick</b> .....	<b>16</b>
<b>8. Quellen und Hilfsmittel</b> .....	<b>17</b>

## 1. Vorwissen und Ziele des Projekts

Aus dem Erdkundeunterricht wissen wir, dass die Temperatur mit zunehmender Höhe abnimmt. Da mit zunehmender Höhe der Luftdruck geringer wird, verlangsamt sich die Teilchenbewegung und damit nimmt die Temperatur ab. Als Faustregel erfahren wir, dass bei 100 m Höhenzunahme es um 0,6°C bis 0,8 °C kälter wird.

Bei Recherchen im Internet fanden wir in verschiedenen Quellen unterschiedliche Angaben. Dafür ein paar Beispiele:

- In der Quelle <https://www.meteoschweiz.admin.ch> lasen wir, dass die Temperatur in der Höhe im Durchschnitt 0,65°C pro 100 m abnimmt. Außerdem erfahren wir dort, dass die Temperaturabnahme von verschiedenen Faktoren abhängt, nämlich von Luftdruck und Wasserdampfgehalt. Wenn die Luft sehr trocken, z.B. < 30% Luftfeuchte, ist, kann sich die Luft pro 100 Meter sogar um fast 1°C abkühlen. Ein Beispiel dafür ist eine starke Hochdrucklage. Die Temperaturentwicklung bei zunehmender Höhe hängt mit dem Luftdruck, der Wärmestrahlung und dem Wasserdampfgehalt eng zusammen.
- Gerhard Lux vom Deutschen Wetterdienst in Hamburg erklärte in einem Interview mit der Süddeutschen Zeitung, dass alle 100 Höhenmeter die Temperatur um rund 1°C abnimmt.

Die gefundenen Aussagen zur Temperaturentwicklung waren nicht eindeutig.

Für die Abnahme des Luftdruckes mit zunehmender Höhe fanden wir verschiedene Berechnungsformeln. Natürlich wird der Luftdruck geringer, je höher wir kommen. Daher werden die Luftdruckangaben auf den Wetterkarten immer auf das Meeresniveau von 0 m umgerechnet, um die Druckwerte auf Wetterkarten vergleichbar zu machen.

**Für unser Forschungsprojekt stellten wir uns folgende Ziele:**

- **Temperatur- und Luftdruckmessungen mit mehreren Sensoren beim Flug in die Stratosphäre durchführen und die Abhängigkeiten von der Flughöhe untersuchen**
- **Vergleich unserer Messdaten mit Daten von professionellen Wetterballonflügen, um die Qualität unserer Messungen abzuschätzen**
- **Darstellung der Temperaturentwicklung bei zunehmender Höhe:**
  - \* Wie verläuft die Temperaturabnahme in unterschiedlichen Höhen?
  - \* In welchen Bereichen nimmt die Temperatur zu?

## 2. Betrachtungen zur Atmosphäre und zum Temperaturverlauf in großen Höhen

In der Atmosphäre gibt es verschiedene Schichten, die Troposphäre (bis zu 10 km), die Stratosphäre (bis zu 40 km), die Mesosphäre (bis zu 70 km), die Thermosphäre (bis zu 1000 km) und die Exosphäre (beginnt bei 1000 km). Die beiden zuletzt genannten Schichten, die Thermosphäre und Exosphäre, bilden zusammen die Ionosphäre. Die höchste Schicht der Atmosphäre ist die Exosphäre.

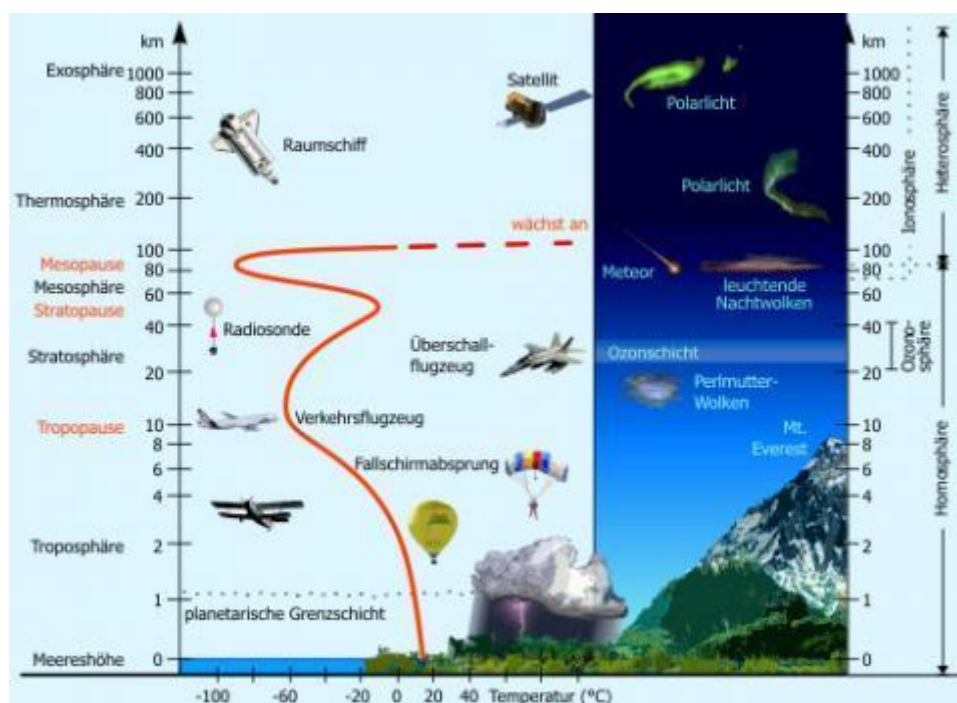
Unser Ballon mit der Box 1 ist 36504 m und der zweite Ballon mit der Box 2 ist 36650 m hochgeflogen, also sind beide bis in die Stratosphäre aufgestiegen. Es gibt „Grenzen“ zwischen den verschiedenen Schichten: Die Troposphäre wird von der Tropopause begrenzt, die Stratosphäre von der Stratopause.

Die Mesosphäre wird von der Mesopause begrenzt. Die Exosphäre hat keine Begrenzung, sie geht sozusagen ins Unendliche weiter.

Natürlich kann die in Erdkunde gelernte Temperaturabnahme mit wachsender Höhe nicht immer so weiter gehen, da man ja sonst unendlich tiefe Temperaturen erreichen würde. Wir wissen aus dem naturwissenschaftlichen Unterricht, dass es einen absoluten Nullpunkt der Temperatur gibt, und zwar dort, wo keine Teilchenbewegung mehr vorkommt. Diese Temperatur 0 Kelvin liegt bei minus 273,15°C.

Zunächst ist die Temperaturabnahme nur auf die Troposphäre begrenzt. Schon auf Höhe der Tropopause (ca. 11 km) erkennt man eine andere Entwicklung. In diesem Bereich ist die Temperatur nahezu konstant, aber danach steigt sie bis ca. 0 °C an. Grund dafür ist die Ozonschicht: Sie wandelt die energiereiche ultraviolette (UV) Strahlung in Wärme um.

In der darauffolgenden Mesosphäre fällt die Temperatur auf ein Minimum der Temperatur von ca. -90 °C. Hier wird die Luft nicht durch Ozon, wie in der Stratosphäre, erwärmt. Aufgrund des fehlenden Luftdruckes kann dieser für keine höheren Temperaturen sorgen. In der Thermosphäre steigt die Temperatur am Tag wieder an, nämlich auf 1700 °C. Verantwortlich für die hohen Temperaturen am Tag sind die Strahlen der Sonne. In der Nacht, reduziert sich die Temperatur dort auf 300 °C. Das kommt daher, dass die Luftmoleküle sich aufgrund des nahezu nicht vorhandenen Drucks sehr schnell bewegen können und viel Energie beim Aufprallen gegeneinander frei wird. In der Exosphäre passiert das Gleiche wie in der Thermosphäre.



Darstellung der Atmosphärenschichten (Quelle:<https://www.gutefrage.net/frage/was-ist-eine-atmosphaere>)

### 3. Missionsvorbereitung und verwendete Sensoren

Im April 2022 starteten wir mit der Konstruktion unserer Mess-Box. Die verwendeten Sensoren zur Druck- und Temperaturmessung wählten wir so aus, dass sie leicht und preiswert sind und sich an ein Arduino Bord anschließen lassen.

In unserer Box verwendeten wir:

- BMP 280      Temperatur [ $\pm 1^\circ\text{C}$ ] + Druck [ $\pm 1$  hPa]
- Datenlogger STRATO3 mit GPS-Höhenmessung und Temperatursensor NPX - LM75B

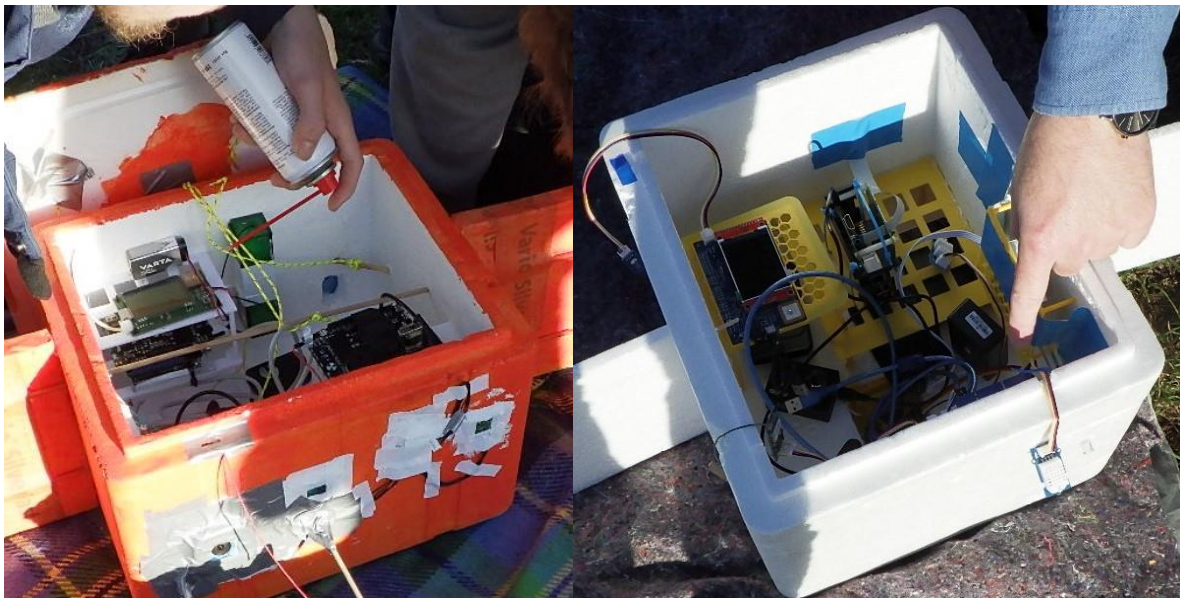
In der Box 2 der Hochschule waren verbaut:

- BMP 280      Temperatur [ $\pm 1^\circ\text{C}$ ] + Druck [ $\pm 1$  hPa]
- Datenlogger STRATO4 mit GPS-Höhenmessung
- und Temperatursensoren NPX - LM75B und MS8607 1

Da die BMP280-Sensoren bei tiefen Temperaturen passen mussten, ab  $-40^\circ\text{C}$  war ihre Messgrenze erreicht, beschränken wir uns in der Arbeit auf die Auswertung der Daten der anderen Sensoren.

Vor dem Starttag testeten wir die Sensoren im Langzeittest mehrfach an unserer Schule. Letzte Korrekturen am Programmcode wurden vorgenommen, um das Speichern der zahlreichen Daten auf unseren gekauften SD-Karten sicher zu stellen. Um die Funktion der Sensoren bei tiefen Temperaturen zu überprüfen, packten wir unsere Box auch in ein Tiefkühlfach. Unsere Temperatur-Sensoren arbeiteten bis  $-23^\circ\text{C}$  und die Messwerte stimmten mit den Angaben des Faches gut überein. Tiefere Temperaturen konnten wir in unseren Vorabtests nicht erreichen.

Auf den Fotos sieht man die Befestigung unserer Sensoren unmittelbar vor dem Start.



## 4. Unser Flugtag (21.9.2022)

Am Mittwoch, dem 21. September 2022, war es endlich so weit: Nach bereits mehrfachen Startverschiebungen passten die Luftströmungen und das Wetter, sodass die Ballone in Richtung Land flogen. Unser Team traf sich im Selbstlernzentrum der Schule und fällte nach einer letzten Überprüfung der Flugsimulation die Startentscheidung.

Alle Hilfsmittel wurden zusammengepackt und in einen Transportwagen geladen. Wir fuhren zu unserem traditionellen Startplatz, dem Banter See Park in Wilhelmshaven. Bei der abschließenden Bestimmung der Masse und der Nutzlast wurde festgestellt, dass die Befestigungsmaterialien schwerer waren, als erwartet und vorausberechnet. Wir mussten befürchten, dass die vorhandene Gasmenge zum Aufstieg nicht ausreicht. Spontan wurden drei Mitglieder der Gruppe damit beauftragt, eine weitere kleine, verfügbare Gasflasche (Helium) aus der Stadt zu besorgen. Die Gasflasche eines Partyballons wurde herangezogen, um den nötigen Gehalt im Wetterballon sicher zu decken.

Während ein Teil der Gruppe die beiden Ballons mit Ballongas füllten, kümmerte sich der andere Teil um das Abarbeiten der Checkliste. Alle Sensoren und die Kameras wurden planmäßig aktiviert, befestigt und die Box sicher verklebt. Gegen 10:45 Uhr informierten wir die Flugsicherung, wie vorher abgesprochen, über den unmittelbar bevorstehenden Start unserer beiden Wetterballons. Gemeinsam mit den anwesenden Mitgliedern unserer Schulgemeinschaft zählten wir gegen 11 Uhr den Start-Countdown herunter und beide Boxen stiegen nacheinander mit etwa 4 bis 5 m/s in die Höhe.

Die Starts der Box und seiner Zwillingsbox verliefen dank unserer erstmals praktizierten Startleine-Methode (wie oben auf dem Bild zu erkennen ist) fast ruck frei und bald erreichten die beiden Boxen die Stratosphäre.

Sie stiegen bis über 36.000 Meter auf, bis die beiden Ballons bei etwa 6 hPa Umgebungsdruck letztendlich platzten und die Nutzlasten mit zunächst großer Geschwindigkeit sich in Richtung Erde bewegten.



*Unser Ballon kurz vor dem Start*

Nach einer bestimmten Höhe hörten unsere GPS-Tracker auf, ein Signal zu senden. Wir fuhren in das vorausberechnete Landegebiet nahe Vechta und hofften auf ein Signal.

Um 13:30 sendete der erste Tracker wieder ein Signal aus und wenig später wurde die Box entspannt in einem Kohlfeld südlich von Wildeshausen geborgen.

Auf dem Bild erkennt man die stark beanspruchte Verbindungsschnur. Der Fallschirm hatte sich bei den Rotationen nach dem Platzen etwas mit der Schnur verknotet und ein optimales Öffnen des Fallschirmes behindert, wie wir auf den Videos später sahen. Nach dem Öffnen der Box waren wir erleichtert, dass der Inhalt nach dem starken Aufprall nur leichte Schäden aufwies.



*Box am Landeort südlich von Wildeshausen*

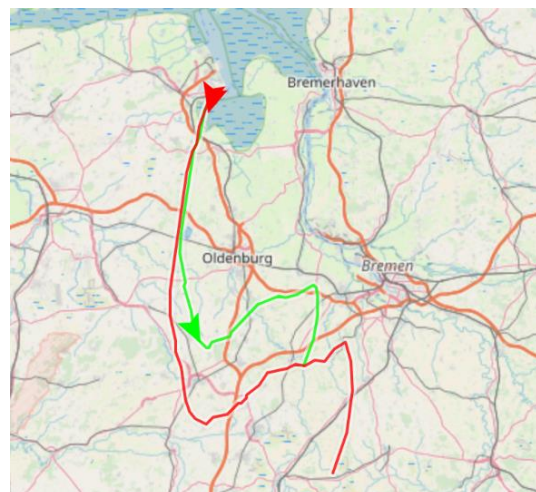
Die zweite Nutzlast flog etwas weiter und verfiel in einer Regenrinne des Hauses einer Familie, wurde aber ebenfalls geborgen. Unsere Sensoren haben alle Messwerte auf SD-Karten gespeichert, so dass wir nun diese Daten auswerteten.

## 5. Darstellung und Auswertung unserer Messergebnisse

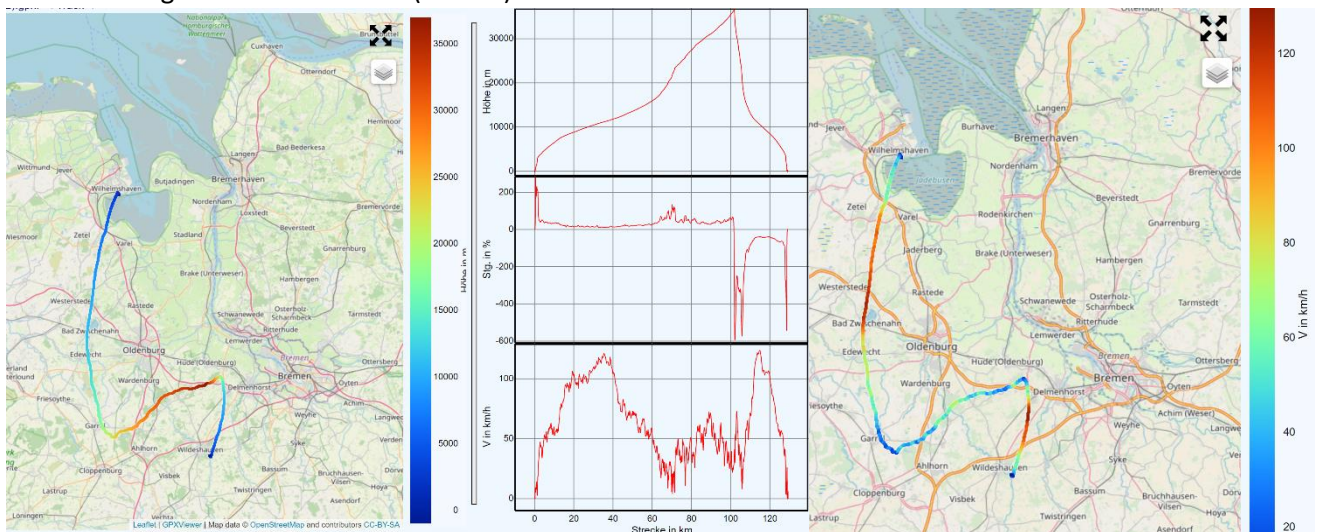
### 5.1. Die Flugkurve unserer beiden Ballone

Beide Ballone starteten am gleichen Ort (s.o.), etwa knapp 5 Minuten zeitversetzt. Aufgrund der unterschiedlichen Massen der Nutzlast und der damit etwas unterschiedlichen Steiggeschwindigkeiten, gab es leicht unterschiedliche Flugkurven.

Die Flugkurve unseres Ballons mit der Box 1 ist grün dargestellt. Sein Gewicht war aufgrund zahlreicherer Messgeräte größer als beim Ballon der Hochschule mit der Box 2, rot dargestellt. Ballon 2 fand sich aufgrund einer etwas geringeren Steiggeschwindigkeit etwas länger in dem Höhenbereich mit der stärksten Luftströmung Richtung Süden. Dadurch flog er etwas länger und weiter. Beide Ballone erreichten etwa die gleiche Platzhöhe (ca. 36.500 m).



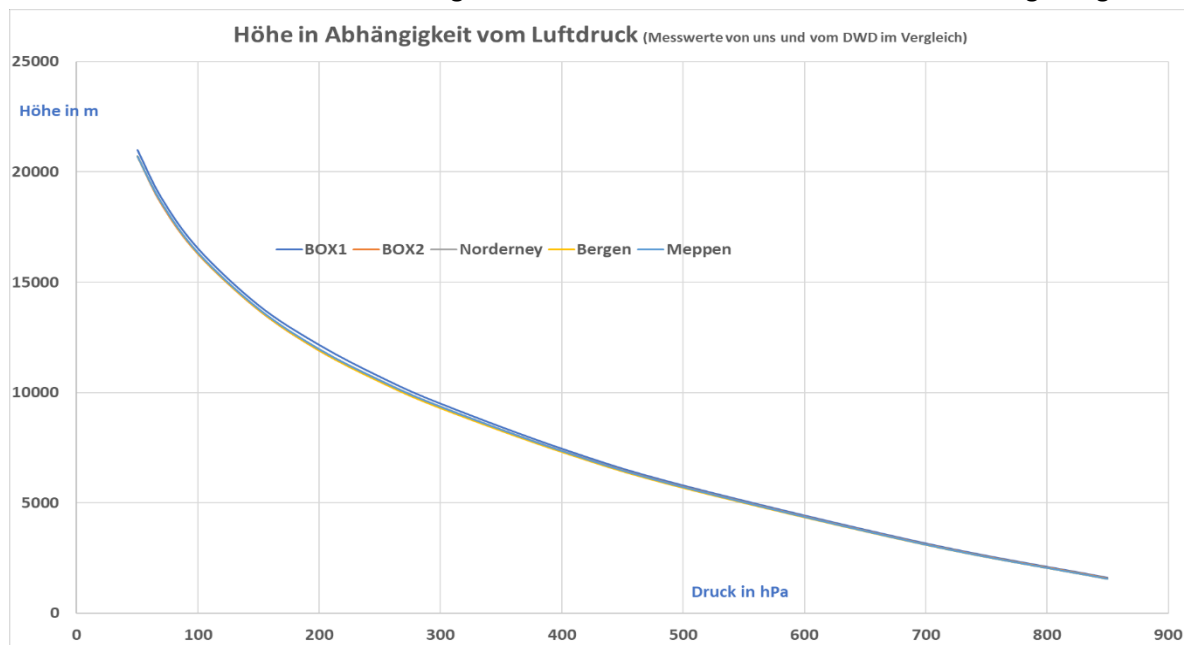
In den beiden folgenden Diagrammen erkennt man die zugehörige Flughöhe (links) bzw. die Geschwindigkeiten über Grund (rechte) von unserer Box 1:



Während des gesamten Fluges wurden alle paar Sekunden mit unterschiedlichen Sensoren Temperatur, Luftdruck, Höhe u.a. Messdaten auf die SD-Karten geschrieben. Unser Flug bestand aus dem langsamen Aufstieg und nach dem Platzen dem rasanten Absturz, der in den letzten Kilometern durch einen Fallschirm etwas gebremst wurde. Für unsere Auswertungen betrachten wir die Daten während des Aufstieges von 0 auf etwas über 36.500 m.

## 5.2. Luftdruckmessung

Der Abnahme des Luftdrucks mit steigender Höhe wurde von unseren Sensoren sehr gut registriert.



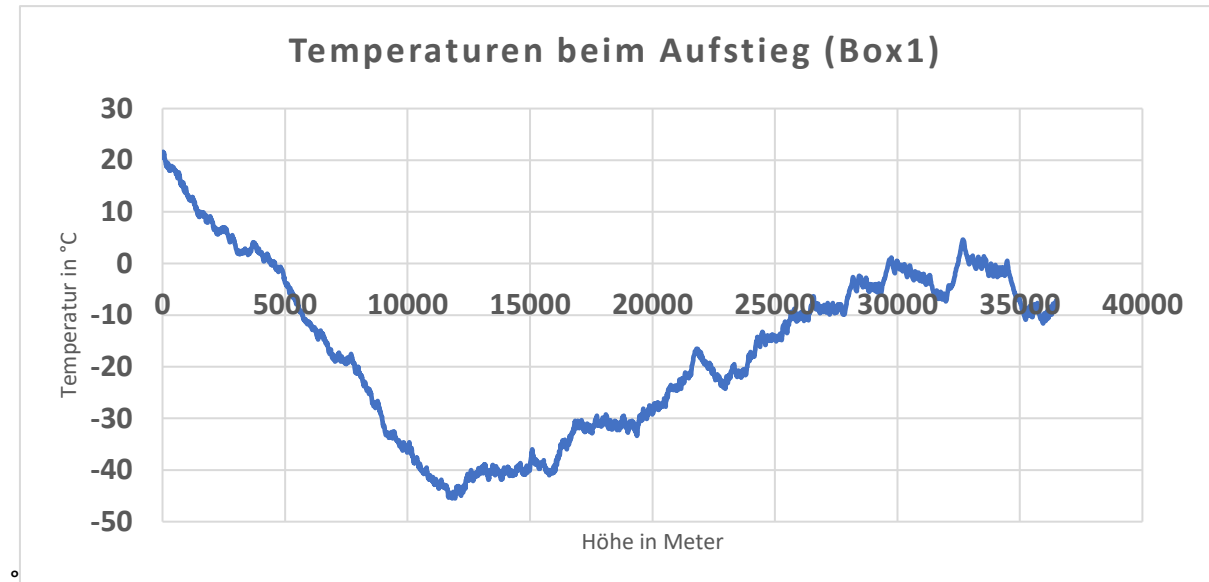
Im Diagramm liegen die Graphen der Messwerte unserer Boxen und der drei Wetterballon-Flüge unseres Starttages annähernd übereinander. Die Messwerte zeigten nur geringe Unterschiede. Wir haben bei der Überprüfung mit bekannten Formeln festgestellt, dass unsere Werte aufgrund unserer Hochdruck-Wetterlage am Starttag etwas abwichen, da sich unsere gefundenen Formeln sich auf den durchschnittlichen Luftdruck (1013hPa) bezogen. Unsere preiswerten Drucksensoren lieferten offensichtlich sehr gute Druckmesswerte.



### 5.3. Temperaturmessungen

#### 5.3.1. Messwerte von Box 1

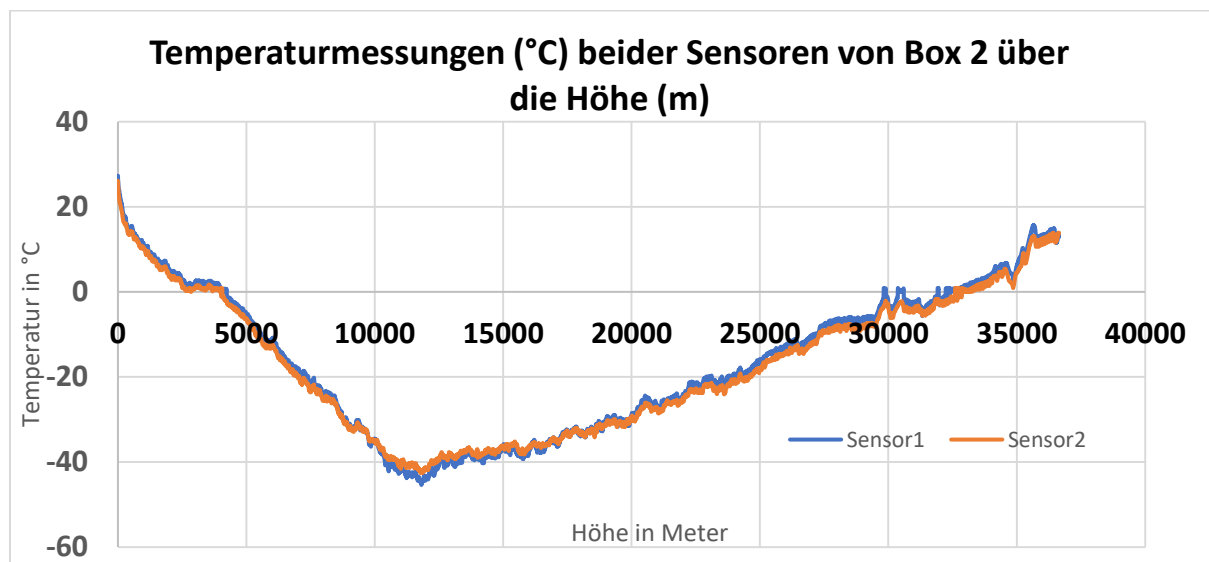
Im folgenden Diagramm sind die Temperaturmesswerte (in °C) der Box 1 in Abhängigkeit von der Flughöhe (in m) dargestellt.



Man erkennt, dass bis etwa 12 km Höhe die Temperatur unterschiedlich stark abnimmt. Beim weiteren Aufstieg nimmt die Temperatur in den meisten Abschnitten wieder zu.

#### 5.3.2. Messwerte von Box 2

In Box 2 hatten wir, wie oben beschrieben, mit zwei unterschiedlichen Sensoren gemessen, die nebeneinander angebracht waren. Im folgenden Diagramm erkennt man gut, dass beide Sensoren vergleichbare Temperaturen registrierten.



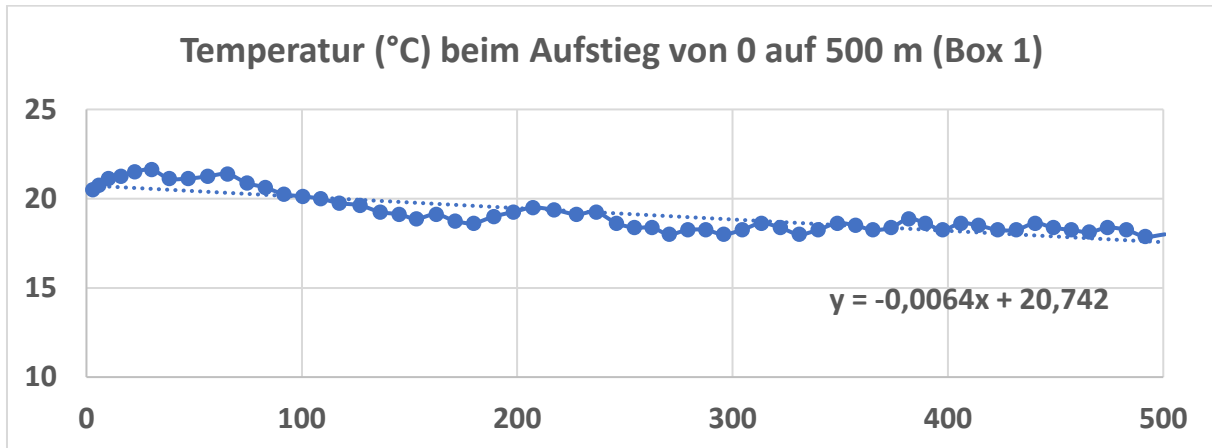
Der Temperaturverlauf ähnelt den Werten von Box1. Die Startwerte und Werte in Maximalhöhe sind bei dieser Box höher. Dort war offensichtlich der Einfluss der Sonnenstrahlung größer, die Abdeckung der Sensoren vor den wärmenden Sonnenstrahlen waren bei dieser Box nicht so gut.

## 5.4. Temperaturgradienten

In diesem Abschnitt gehen wir nun genauer auf die Temperaturabnahmen pro 100 m Höhenzunahme ein. Dazu gab es verschiedene Angaben und unsere wichtigste Forschungsfrage war herauszufinden, welche Angabe am besten zutrifft. Am groben Verlauf der Temperaturkurven in Kapitel 4.3. erkannten wir bereits, dass es in unterschiedlichen Abschnitten unterschiedliche Zu- bzw. Abnahmen der Temperatur gibt. Wir entschieden uns, die Änderungsraten in 500 m Schichten zu ermitteln.

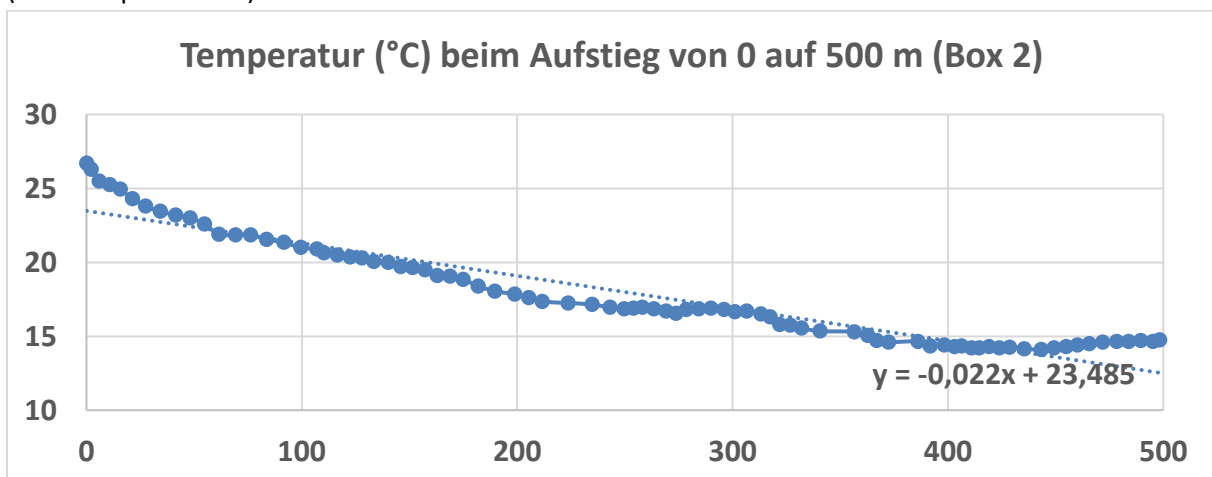
### 5.4.1. Die ersten 500 m

Im folgenden Diagramm ist die Temperaturentwicklung bis 500 m von Box 1 dargestellt.



In unmittelbarer Erdnähe gibt es zunächst einen leichten Anstieg der Temperatur, aber man erkennt insgesamt bereits bei den ersten 500 m die Abkühlung. Um einen konkreten Wert für die mittlere Abnahme zu bekommen, ließen wir in EXCEL eine Trendlinie und deren Regressionsgleichung ermitteln. Der Anstieg  $-0,0064$  in der Gleichung steht für die durchschnittliche Temperaturveränderung im betrachteten Höhenintervall. Pro zunehmenden Höhenmeter nimmt die Temperatur also um  $0,0064$  Grad ab, was einer Temperaturabnahme von  $0,64$  °C auf  $100$  m entspricht. Das stimmt sehr gut mit den Angaben der Quelle <https://www.meteoschweiz.admin.ch> überein. Bei der Betrachtung weiterer Höhenintervalle erwies sich diese Übereinstimmung eher als Zufall.

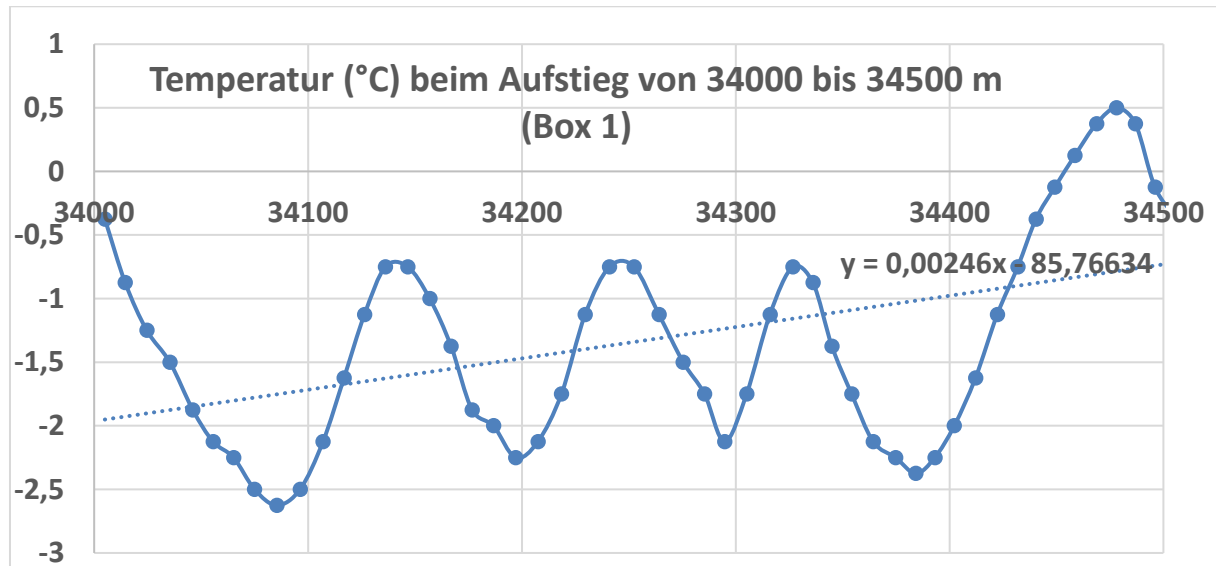
Die Box 2 hatte eine viel stärkere Abkühlung registriert, da ihre Starttemperatur wesentlich höher lag. Sie war am Boden offensichtlich größerer Sonneneinstrahlung ausgesetzt. Bei der Auswertung der Daten der Box 2 nahmen wir den Durchschnitt der beiden Temperatur-Sensoren (siehe Kapitel 4.3.2).



Wie man anhand der Regressionsgleichung erkennt, lag hier die durchschnittliche Temperaturabnahme auf 100 m Höhenzunahme bei 2,2 °C. Für die höhere Temperaturabnahme im Vergleich zur Box 1 ist die zu hohe Starttemperatur verantwortlich.

#### 5.4.2. In großer Höhe

In der Stratosphäre kam es dann zu der schon angesprochenen Erwärmung beim Aufstieg. Im folgenden Diagramm haben wir einen weiteren 500 m- Bereich ausgewählt.



Man erkennt deutlich die sich wiederholenden Schwankungen. Temperaturabnahmen und -zunahmen wechseln sich hier um den Gefrierpunkt ab. Die Schwankungen führen wir auf die Drehung unserer Box und damit der Ausrichtung zur Sonne zurück, die regelmäßig während des Fluges stattfand, was wir auf den Filmen unserer Kameras gut beobachteten. In dem dargestellten Bereich betrug die durchschnittliche Temperaturzunahme 0,246 Grad je 100m.

#### 5.4.3. Gesamte Änderungsdaten

Wie schon angesprochen führten wir diese Berechnungen für jede 500 m Schicht durch und kamen zu unterschiedlichen Durchschnittswerten in den einzelnen Höhenbereichen.

In den Tabellen sind die Temperaturänderungen (TÄ) in °C pro 100 m Höherzunahme beider Messboxen (B1 und B2) und der sich daraus ergebende Mittelwert (MW) dargestellt:

Höhe	0	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000	6500	7000
bis	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000	6500	7000	7500
TÄ B1	-0,64	-0,93	-0,80	-0,30	-0,23	-0,60	0,00	-0,05	-0,37	-0,58	-0,84	-0,79	-0,45	-1,02	-0,18
TÄ B2	-2,20	-0,87	-0,66	-0,36	-0,30	-0,11	-0,12	-0,23	-0,78	-0,53	-0,85	-0,35	-0,94	-0,56	-0,60
MW	-1,42	-0,90	-0,73	-0,33	-0,26	-0,36	-0,06	-0,14	-0,57	-0,55	-0,84	-0,57	-0,69	-0,79	-0,39

Höhe	7500	8000	8500	9000	9500	10000	10500	11000	11500	12000	12500	13000	13500
bis	8000	8500	9000	9500	10000	10500	11000	11500	12000	12500	13000	13500	14000
TÄ B1	-0,56	-0,87	-0,78	-0,25	-0,40	-0,84	-0,45	-0,25	-0,27	0,52	0,27	-0,14	-0,09
TÄ B2	-0,56	-0,28	-1,02	0,13	-0,78	-1,00	-0,31	-0,24	-0,24	0,54	0,05	0,41	-0,16
MW	-0,56	-0,58	-0,90	-0,06	-0,59	-0,92	-0,38	-0,24	-0,26	0,53	0,16	0,13	-0,13

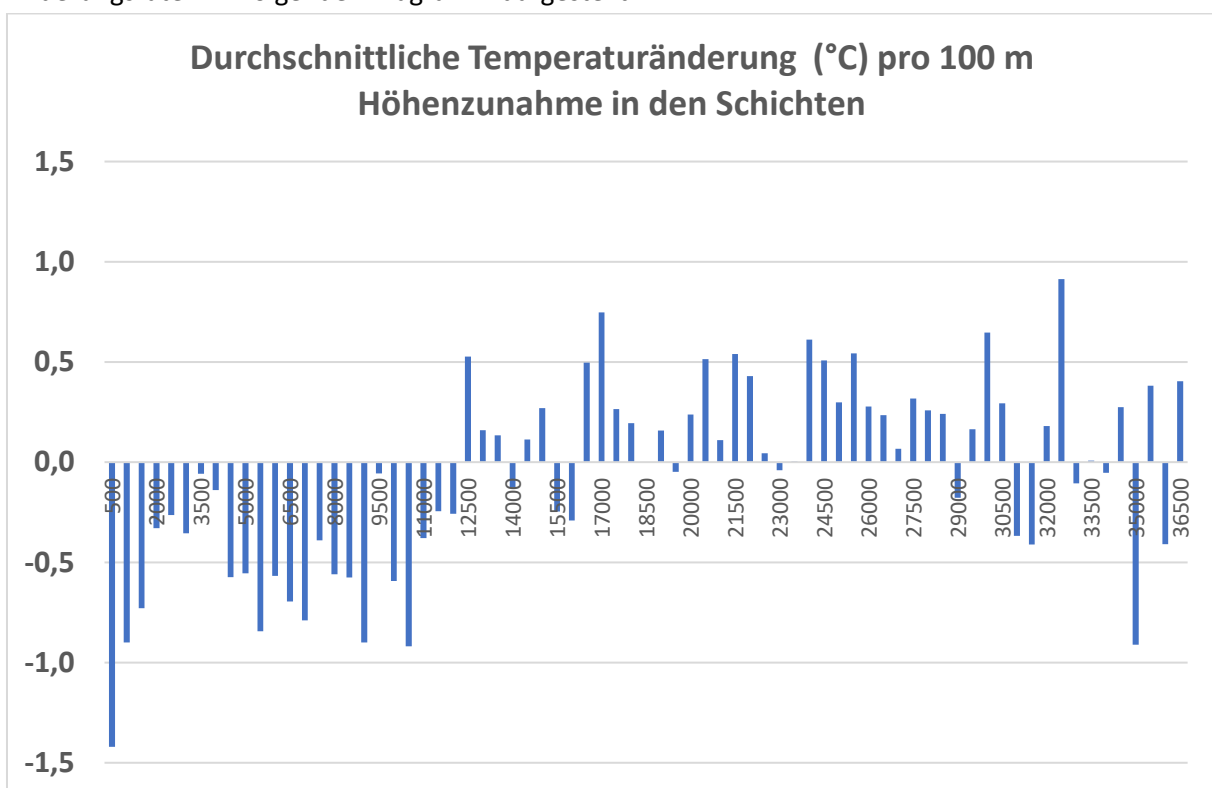
Wie man erkennt, gibt es durchaus Abweichungen zwischen beiden Boxen, was auf unterschiedliche Sonneneinstrahlung und die etwas unterschiedlichen Fluggebiete zurückzuführen ist. Bis 12 km ist aber eine Temperaturabnahme in allen Luftschichten zu erkennen.

Oberhalb von 12 km nimmt die Temperatur überwiegend leicht zu.

Höhe	14500	15000	15500	16000	16500	17000	17500	18000	18500	19000	19500	20000
bis	15000	15500	16000	16500	17000	17500	18000	18500	19000	19500	20000	20500
TÄ B1	0,16	-0,56	-0,56	1,12	1,03	-0,14	0,24	-0,22	0,05	0,00	0,35	0,23
TÄ B2	0,38	0,06	-0,03	-0,13	0,46	0,67	0,15	0,22	0,27	-0,10	0,13	0,80
MW	0,27	-0,25	-0,29	0,50	0,75	0,27	0,19	0,00	0,16	-0,05	0,24	0,51

Die Tabellenwerte höherer Schichten stellen wir aus Platzgründen hier nicht einzeln dar.

Abschließend sind die Durchschnitte der von allen drei Sensoren für alle Schichten gemessenen Änderungsraten im folgenden Diagramm dargestellt:



Man erkennt, dass die Temperatur bis zu einer Höhe von knapp 12.500 Metern abnimmt. Bis dahin ist jeder Anstieg unserer Ausgleichgeraden in den 500-Meter-Intervallen negativ. Die konkreten Abnahmewerte schwanken und sind auch bei beiden Boxen nicht gleich. Die theoretischen Vorgaben von Abnahmen zwischen 0,6 bis 1 °C pro 100 m treffen nur in einigen Höhenbereichen zu.

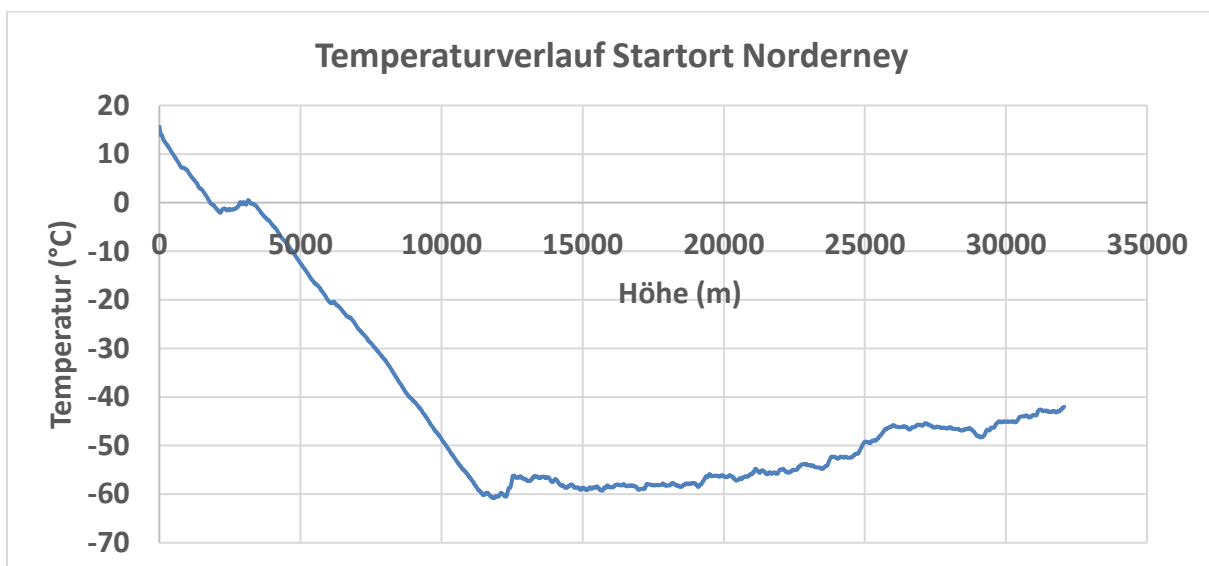
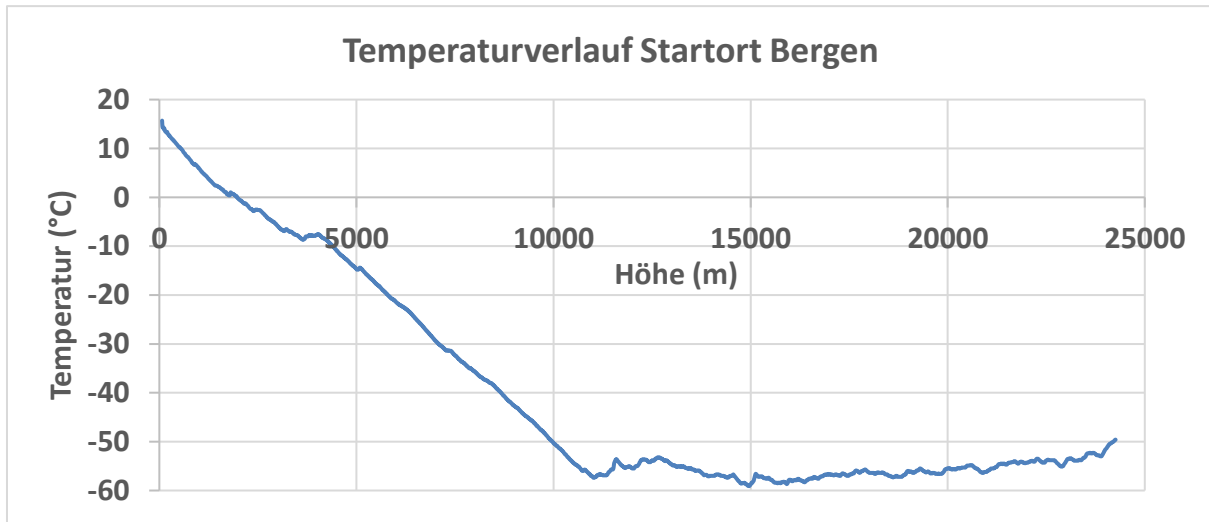
Ab 12.500 m nimmt die Temperatur in fast allen Bereichen wieder zu. Ab 30.000 m schwankt die Entwicklung zwischen Temperaturabnahme und Temperaturzunahme.

## 6. Vergleich mit Messdaten des DWD

### 6.1. Temperaturmessungen der Radiosonden-Aufstiege

Um die Genauigkeiten unsere Messwerte besser abzuschätzen, haben wir sie mit Daten von Radiosonden von Wetterstationen aus unserem Fluggebiet verglichen. Für unseren Starttag haben wir Daten aus Meppen (Startzeit 9:00 MEZ) und Daten aus Norderney und Bergen (Niedersachsen, Startzeit jeweils 11 Uhr MEZ) beim Deutschen Wetterdienst erhalten.

In den beiden folgenden Diagrammen haben wir den Temperaturverlauf der zeitnahen Startorte dargestellt.



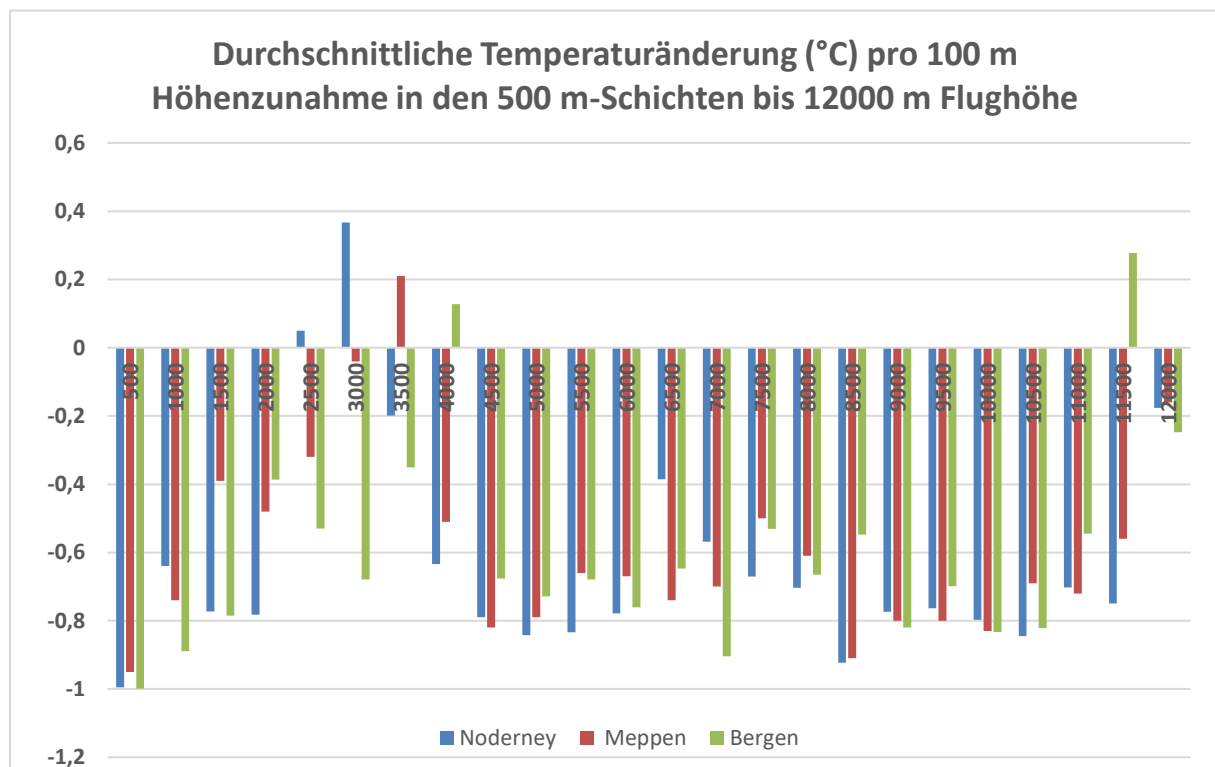
Wenn man die Temperatur-Messdaten aus Bergen und Norderney mit unseren Messungen (siehe Kapitel 5.3.) vergleicht, fällt auf, dass unsere preiswerten Sensoren offensichtlich nicht mehr die tiefen Temperaturen korrekt aufzeichneten. Der allgemeine Temperaturtrend beim Aufstieg bis auf 10 km ist ähnlich, während unsere Sensoren bei  $-45\text{ °C}$  ihren minimalen Wert erreichten, lagen die tatsächlichen Tiefsttemperaturen offensichtlich bei  $-60\text{ °C}$ . Der beim weiteren Aufstieg in der unteren Stratosphäre Temperaturanstieg erfolgte offensichtlich viel langsamer, als bei unseren Messungen registriert. Vielleicht haben unsere Sensoren bei den tiefen Temperaturen einen Schaden genommen oder die Sonneneinstrahlung hatte bei unserer Box einen sehr starken Einfluss, da die Abschirmung der

Sensoren vor der Wärmestrahlung der Sonne nicht ausreichend war. Ohne diese Vergleichsdaten hätten wir aus unseren Messwerten gefolgert, dass in Höhe über 30 km wieder Temperaturen um die 0 °C erreicht würden, denn unsere Temperaturwerte stiegen sogar bis in den positiven Bereich an.

Auffallend ist der kleine Bereich der Temperaturtrendumkehr unterhalb von 5000 m, der an jenem Tag offensichtlich bei allen Wetterballonflügen (auch bei unseren Messdaten) sichtbar ist.

## 6.2. Temperaturgradienten der Radiosonden-Messungen

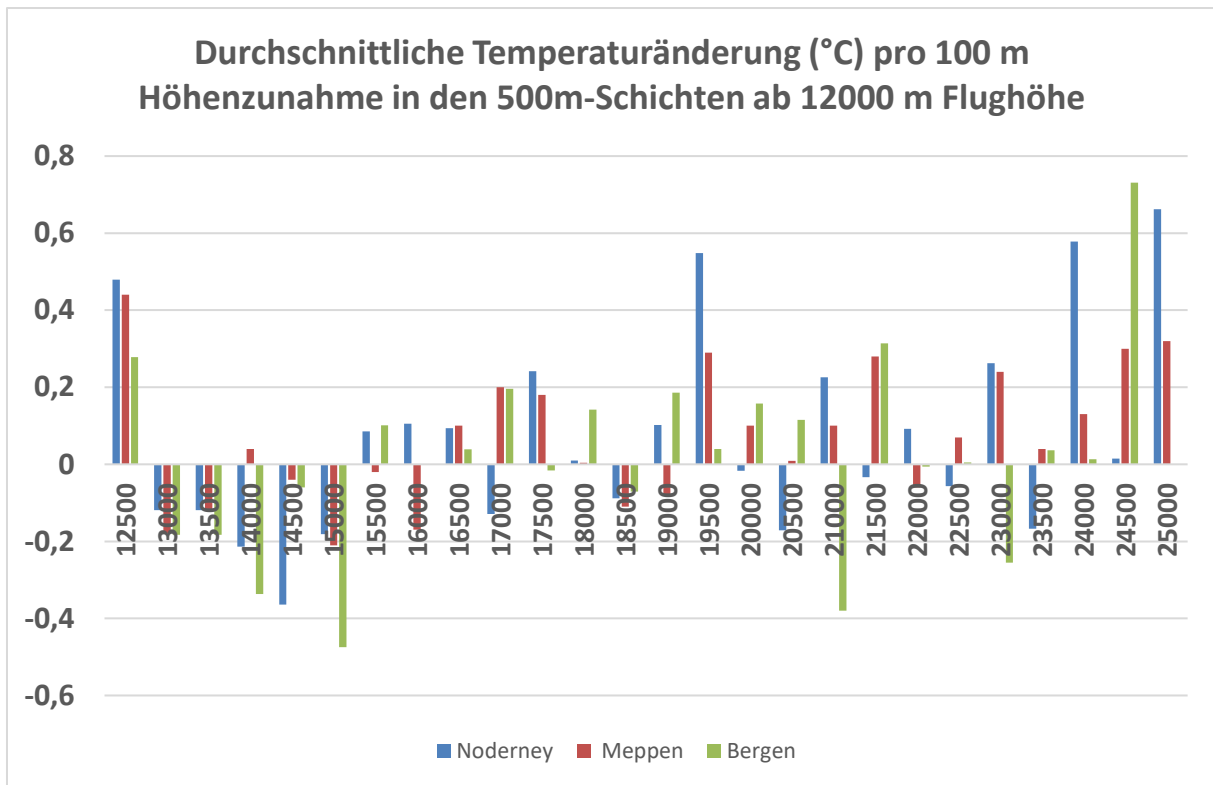
Auch für die Daten der drei professionellen Wetterballon-Flüge haben wir in den gleichen 500 m-Intervallen die durchschnittlichen Temperaturänderungen über Ausgleichsgeraden ermittelt. Bei den drei betrachteten Flügen ergaben sich durchaus unterschiedliche Werte für die Temperaturänderungen. Im folgenden Diagramm betrachten wir den Aufstieg bis auf 12 km.



Man erkennt, dass genau wie bei unserer Messung die Temperatur bis 12 km meist zwischen 0,4 bis 1 °C je 100 m Höhenzunahme sinkt. Auf den ersten 500 m des Aufstiegs beträgt diese Abnahme etwa 1 °C pro 100 m und ist am stärksten. Danach gibt es durchaus unterschiedliche Abnahmewerte bei den drei Ballonflügen des Deutschen Wetterdienstes.

Wie schon bei der Auswertung der Temperaturwerte angesprochen, gibt es zwischen 3000 und 4500 m jeweils eine Luftschicht mit umgekehrtem Temperaturverlauf. Diese lag bei dem Ballonflug von Norderney in einer etwas geringeren Höhe (12.000 m), als bei den Ballonflügen von Meppen und Bergen. Diese spezielle Luftschicht stellten auch wir in einer Höhe um 3500 m bei unseren beiden Ballonflügen fest.

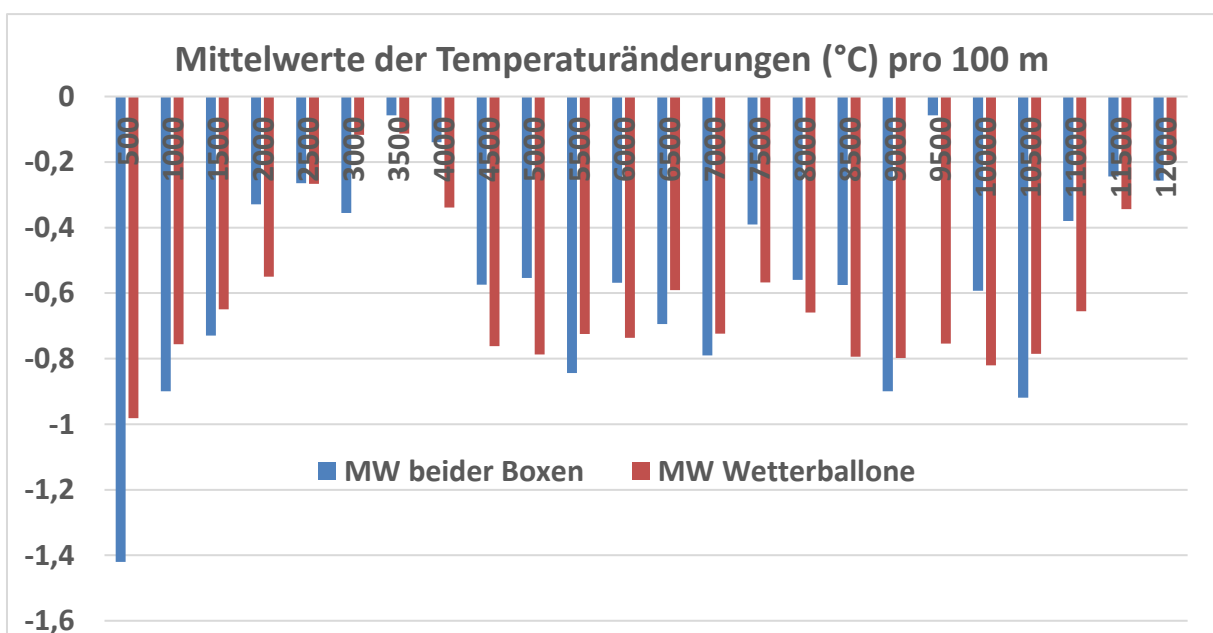
In größeren Flughöhen gab es die schon angesprochene leichte Erwärmung, wobei es immer mal wieder ein Wechsel zwischen Temperaturzunahme und -abnahme stattfand.



Bei den Wetterballon-Flügen gab es im Bereich von 13 bis 15 km leichte Temperaturabnahmen. Diesen Verlauf erfassten unsere Sensoren nicht. Der allgemeine Temperaturanstieg fiel bei unseren Messungen deutlich höher aus, was offensichtlich auf Messfehler unserer Sensoren zurückzuführen ist. Am stärksten ist der Anstieg oberhalb von 24 km. Bei 25 km Flughöhe platzten die Wetterballone von Bergen und Meppen.

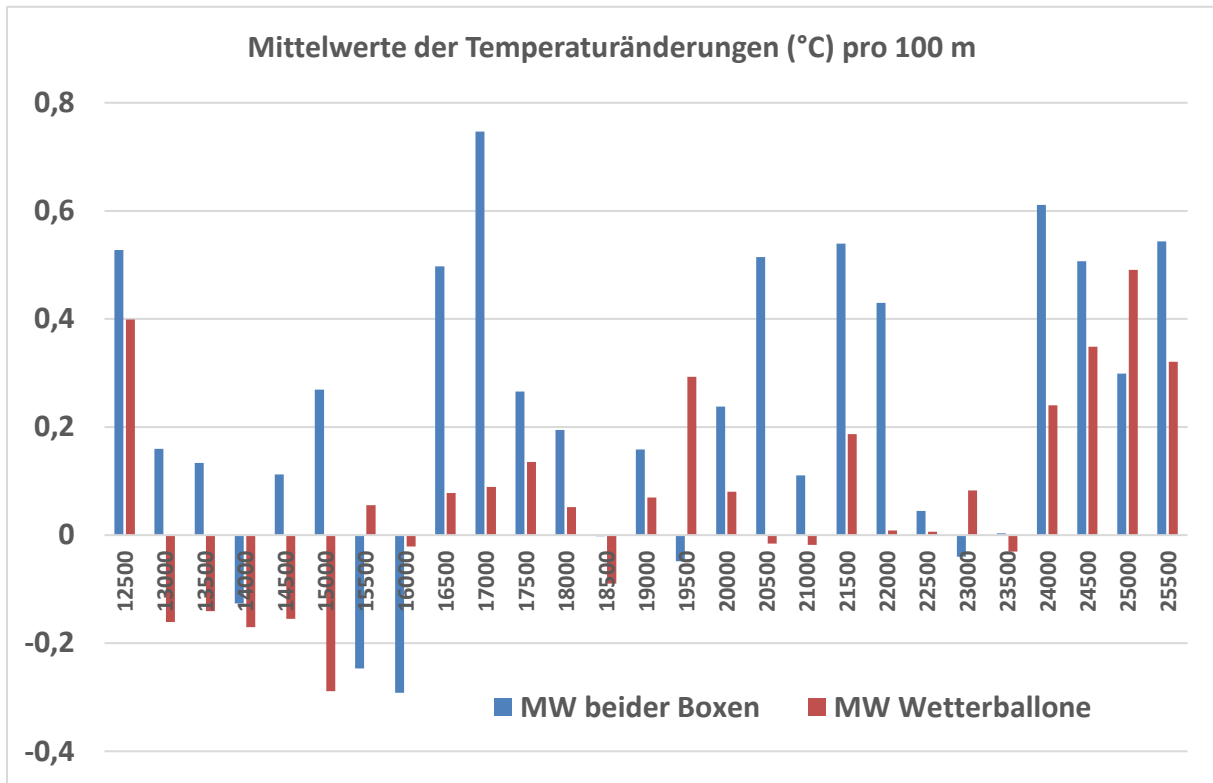
### 6.3. Vergleich der Mittelwerte der Radiosonden-Messungen mit unseren Messwerten

Abschließend wollen wir noch einmal die Mittelwerte der drei professionellen Flüge unserer Region mit dem Mittelwert unserer Temperatur Messungen vergleichen:



Bis 12 km haben wir durchschnittlich sowohl bei den Radiosonden-Messungen des Flugtages, als auch bei unseren Messungen in jeder 500 m-Luftschicht eine Abkühlung bei ansteigender Höhe festgestellt. Die Temperaturabnahmen waren in Bodennähe bei unseren Messungen etwas höher.

Abschließend das Vergleichsdiagramm für größere Höhen:



Die überwiegende Zunahme ist bei beiden Messungsarten erkennbar. Bei unseren fehlerbehafteten Messwerten liegen die Zunahmen allerdings deutlich höher.



## 7. Fazit und Ausblick

Da unser Flug planmäßig abgelaufen ist, sammelten unsere Sensoren viele Messwerte. Da auch die Bergung unserer beiden Boxen gelang, werteten wir unsere Messwerte aus und beantworteten einige Fragen zur Temperatur- und Druckabnahme beim Aufstieg in die Stratosphäre:

- Die Temperatur nimmt bis zur Ozonschicht (ab etwa 11 km) ab. Diese Abnahme verläuft nicht gleichmäßig. Daher verstehen wir auch, dass es unterschiedliche und meist keine konkreten Angaben für die Temperaturabnahme je 100 m gibt.
- Die von uns gesuchte Formel für die Temperaturabnahme gibt es leider nicht, da die Temperaturabnahme von vielen verschiedenen Faktoren abhängt. Selbst zeitgleiche Messungen der professionellen Wetterballonflüge lieferten hier unterschiedliche Ergebnisse.
- Durch den Vergleich unserer Daten mit den Daten des Deutschen Wetterdienstes fanden wir heraus, dass unsere Temperaturmessgeräte bis  $-45^{\circ}\text{C}$  vertrauenswürdige Daten ermittelten und im späteren Verlauf des Fluges deutlich abweichende Messwerte aufzeichneten.
- Die preiswerten Temperatursensoren NPX - LM75B und MS8607 1 arbeiten offensichtlich bei tiefen Temperaturen nicht mehr zuverlässig oder unsere Abdeckung gegen die Sonneneinstrahlung war nicht ausreichend.
- Die Druckabnahme ist bei zunehmender Höhe besser berechenbar. Dazu gibt es verschiedene Berechnungsformeln, die allerdings nur bis zur unteren Schicht der Stratosphäre gute Ergebnisse liefern.
- Unsere Luftdruckmessungen lieferten sehr gute Ergebnisse, die auch mit denen des Deutschen Wetterdienstes übereinstimmen.
- Der dazu verwendete preiswerte Sensor BMP280 arbeitete bei der Druckmessung sehr zuverlässig, während er bei der Messung von tiefen Temperaturen nicht zuverlässig arbeitete.

In den folgenden Wochen wollen wir uns mit weiteren Messdaten des Deutschen Wetterdienstes befassen, um weitere Kenntnisse über den tatsächlichen Temperaturverlauf zu gewinnen.

## 8. Quellen und Hilfsmittel

<https://strato-fische.jimdofree.com/>

[https://www.dwd.de/DE/wetter/thema\\_des\\_tages/2021/10/31.html](https://www.dwd.de/DE/wetter/thema_des_tages/2021/10/31.html)

<https://studyflix.de/erdkunde/atmosphäre-3667>

[https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Aufbau\\_der Atmosph%C3%A4re](https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Aufbau_der_Atmosph%C3%A4re)

[Stockwerke \(gerd-pfeffer.de\)](#)

<https://www.gutefrage.net/frage/was-ist-eine-atmosphaere>

<https://www.meteoschweiz.admin.ch>

<https://www.sueddeutsche.de/leben/tourismus-beim-wandern-luft-pro-100-hoehenmeter-1-grad-kuehler-dpa.urn-newsml-dpa-com-20090101-180801-99-382890>

Radiosonden-Messdaten des Deutschen Wetterdienstes

EXCEL zur Auswertung der Daten