STRATOFLIGHT

EIN FLUG IN DIE **STRATOSPHÄRE**

NAME:

Shane Wilmes

KLASSE:

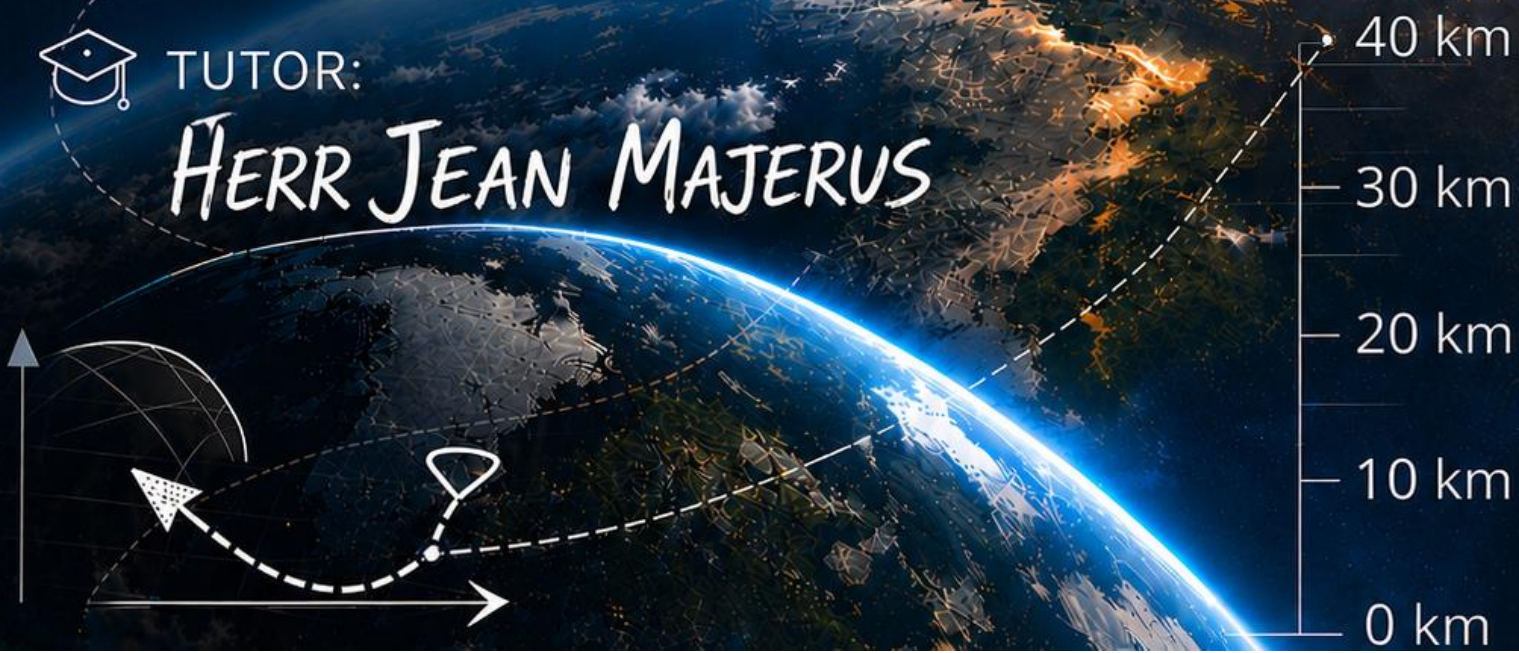
5C2 – Hollenfels

SCHULJAHR:

2025 – 2026

TUTOR:

Herr Jean Majerus



© Shane : Cover und Backcover – Picture generated by ChatGPT

Inhaltsverzeichnis

PROLOG 1

1.KAPITEL: THEORETISCHE ERKENNTNISSE ZU ZEITDILATATION UND MYONEN 2

1.1 RELATIVITÄT DER ZEIT 2

1.2 KLASSISCHE VERSUS RELATIVISTISCHE GESCHWINDIGKEIT 3

1.3 GEDANKENEXPERIMENT MIT DER LICHTUHR 4

1.4 ZEITDILATATION 5

1.5 LÄNGENKONTRAKTION 7

1.6 WICHTIGE ANMERKUNG 7

1.7 ANWENDUNG: MYONEN AUF DER ERDE 8

2. KAPITEL: WETTERBALLON-GUIDE: GRUNDLAGEN, AUFBAU UND FUNKTION 10

2.1 EINLEITUNG 10

2.2 PHYSIKALISCHE GRUNDLAGE DES AUFSTIEGS 12

2.3 AUFBAU EINES WETTERBALLONS 14

2.3.1 DER BALLON 14

2.3.2 DIE NUTZLAST 15

2.3.3 SEILE UND FALLSCHIRM 15

2.4. VERHALTEN IN DER ATMOSPHÄRE 15

2.5. PHYSIKALISCHE GASGESETZE 16

2.6 TEMPERATUR- UND DRUCKVERLAUF 17

2.7 HÖHE DES PLATZENS 18

2.8. RÜCKKEHR ZUR ERDE 18

3.KAPITEL: MESSGERÄTE 19

3.1 TEMPERATURSENSOR SHT45 VON ADAFRUIT 19

3.1.1 EINLEITUNG 19

3.1.2 MESSGENAUIGKEIT UND LEISTUNGSFÄHIGKEIT 20

3.1.3 Technische Schnittstelle 20

3.1.4 Spannungsversorgung und Kompatibilität 20

3.1.5 Software und Anwendung 20

3.1.6 Zusatzfunktionen 20

3.2 Absoluter Luftdrucksensor MPRLS 21

3.2.1 Einleitung 21

3.2.2 Messgenauigkeit und Leistungsfähigkeit 21

3.2.3 Technische Schnittstelle 22

3.2.4 Spannungsversorgung und Kompatibilität 22

3.2.5 Software und Anwendung 22

3.2.6 Zusatzfunktionen 22

3.2.7 Einsatz im Projekt 22

4.KAPITEL: TESTVERSUCHE 23

4.1 Konzeption und Aufbau des Experiments 23

4.1.1 Ziel des ersten Testversuchs 23

4.1.2 Komponenten des Versuchs 23

4.1.2 Versuchsablauf 26

4.1.3 Erste Beobachtungen 27

4.2 Quantitativer Versuch und Auswertung 27

4.2.1 Ausgangsidee und erster Versuch 27

4.2.2 Erste Auswertung und Umgang mit den Daten 28

4.2.3. Warum gibt es keine Temperatursprünge? 28

4.2.4 Suche nach einem physikalischen Zusammenhang 29

4.2.5 Ein wichtiger Zwischenschritt 30

2.2.6 Neue Idee: Kann man die Entfernung zurückberechnen? 30

2.2.7 Bezug zu einem realen Beispiel beim Stratoflight 30

2.2.8 Einfluss eines längeren Kabels 31

4.3 Weitere Tests bei niedrigen Temperaturen 32

4.4 Abschließende Betrachtung und Schlussfolgerung 33

5.KAPITEL: TEAM INSIGHTS 34

6.KAPITEL: LAUNCH DAY 35

EPILOG – DANK UND ANERKENNUNG 37

ANHANG 38

1. MATHEMATISCHE REGELN ZU DEN UNGLEICHHEITEN 38

2. UNGLEICHUNGEN – BEISPIELE 38

3. BEWEIS VON: $\gamma \geq 1$ 39

4. SATZ DES PYTHAGORAS (GEOMETRISCHER BEWEIS) 41

5. ARDUINO – SKETCH: MEIN PROGRAMM FÜR DEN SENSOR STH45 42

BIBLIOGRAFIE 44

Prolog

Im Laufe meiner bisherigen Arbeiten habe ich meine Trape-Projekte meist in Form klassischer, eher wissenschaftlich geprägter Ausarbeitungen dargestellt. Dabei lag der Fokus vor allem auf einer sachlichen und strukturierten Präsentation der Ergebnisse. Für dieses Trape-Projekt habe ich mich jedoch bewusst für einen anderen Ansatz entschieden. Anstatt einer rein analytischen Darstellung war es mir wichtig, dass diese Arbeit als eine Art Leitfaden dient, der den gesamten Ablauf des Ballonflugs verständlich und praxisnah vermittelt.

Die Idee hinter diesem Guide ist es, nicht nur zu zeigen, was im Projekt „Stratoflight“ erreicht wurde, sondern vor allem, wie man zu diesen Ergebnissen gelangen kann. Der Text soll somit eine Orientierung bieten und Schritt für Schritt durch die einzelnen Phasen führen. Dabei stehen insbesondere die Vorgehensweisen, Entscheidungen und auch auftretende Probleme im Mittelpunkt, da gerade sie entscheidend für das Gelingen eines Projekts sind.

Zu Beginn wird das grundlegende Ziel des Projekts erläutert, um ein klares Verständnis für die Ausgangssituation und die zugrunde liegende Idee zu schaffen. Darauf aufbauend werden die verschiedenen Phasen von der Planung über die Organisation bis hin zur technischen Vorbereitung und praktischen Umsetzung nachvollziehbar beschrieben. Ziel ist es, den Ablauf so darzustellen, dass er auch für andere verständlich und gegebenenfalls übertragbar ist.

Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf den eingesetzten Messgeräten und deren Anwendung. Hier wird erklärt, wie die einzelnen Komponenten funktionieren, welche Aufgaben sie übernehmen und worauf bei ihrem Einsatz geachtet werden muss. Durch realitätsnahe Versuche zeigen wir, wie diese Messgeräte ausführlich getestet und auf ihre Tauglichkeit überprüft werden. Die Abstimmung der technischen Elemente spielt eine zentrale Rolle und wird daher ausführlich behandelt.

Darüber hinaus wird auch die Zusammenarbeit im Team thematisiert. Anhand von Erfahrungen innerhalb der Gruppe wird verdeutlicht, wie Aufgaben verteilt werden, welche Herausforderungen auftreten können und wie gemeinsame Lösungen entwickelt werden. Dies zeigt, dass der Erfolg eines Projekts nicht allein von technischen Fähigkeiten abhängt, sondern ebenso von Kommunikation, Organisation und Teamarbeit.

Insgesamt soll dieser Guide nicht nur den Projektverlauf veranschaulichen, sondern auch dazu anregen, eigene Ideen umzusetzen und neue Wege auszuprobieren. Für mich persönlich stellt diese Herangehensweise eine bewusste Abweichung von meinen bisherigen Arbeiten dar und ermöglicht es, meine Erfahrungen auf eine praxisorientierte und zugängliche Weise weiterzugeben.

1.Kapitel: Theoretische Erkenntnisse zu Zeitdilatation und Myonen

1.1 Relativität der Zeit

In der Relativitätstheorie wird die Zeit keine feste Größe mehr, sondern hängt vom Bewegungszustand ab. Das bedeutet, dass die Taktdauer T einer Uhr nicht für alle Beobachter gleich ist. Eine besondere Rolle spielt dabei die sogenannte Eigenzeit T_0. Sie ist die Zeit, die eine Uhr in ihrem eigenen Ruhesystem misst und bleibt dort eine feste, invariante Größe. Ähnliche Überlegungen gelten auch für Längen und Massen, bei denen zwischen Ruhegrößen und bewegten Größen unterschieden wird.

Die Frage „Was ist Zeit?“ wirkt zunächst sehr grundlegend, wird aber von Einstein erstaunlich einfach beantwortet. Zeit ist das, was eine Uhr misst, also der Ablauf von Tick und Tack. Genau dieser Takt kann sich jedoch verändern, wenn sich die Uhr bewegt.

Eine zentrale Grundlage der speziellen Relativitätstheorie ist die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum. Sie hat den festen Wert:

$$c = 2{,}99792458 \cdot 10^8 \text{ m/s} = 299\,792{,}5 \text{ km/s} \approx 300\,000 \text{ km/s} \; = 7{,}5 \cdot \; 40\,000 \text{ km/s}$$

Anschaulich kann man sagen, dass Licht etwa 7,5-mal pro Sekunde um die Erde fliegen könnte.

Einstein sagt nun in seinem zentralen Ansatz: die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ist unabhängig vom Beobachter und von der Bewegung der Lichtquelle.

➔ **Die Lichtgeschwindigkeit c im Vakuum ist konstant.**

Daraus folgt direkt eine wichtige Einschränkung: $0 \leq v < c$

Kein Körper mit Masse kann schneller als Licht sein. Lichtteilchen, also Photonen, besitzen keine Ruhemasse und bewegen sich deshalb immer mit dieser Geschwindigkeit.

➔ Ein **weiterer** zentraler Gedanke ist das **Relativitätsprinzip**.

Es besagt, dass alle physikalischen Experimente in jedem Inertialsystem gleich ablaufen. Ein Inertialsystem ist dabei ein Bezugssystem, das sich geradlinig und gleichförmig bewegt, also ohne Beschleunigung. Innerhalb eines solchen Systems kann man durch kein Experiment feststellen, ob man sich bewegt oder nicht.

1.2 Klassische versus relativistische Geschwindigkeit

Um den Unterschied zur Relativitätstheorie zu verstehen, kann man zuerst ein Beispiel aus dem Alltag betrachten. Ein Zug fährt mit der Geschwindigkeit (v) an einem Bahnsteig vorbei. Eine Person im Zug wirft einen Ball mit der Geschwindigkeit (v_B).

Für einen Beobachter am Bahnsteig ergibt sich die gemessene Geschwindigkeit des Balls durch einfaches Addieren:

- nach vorne (in Zugrichtung): $v'_B = v + v_B$
- nach hinten (in Gegenrichtung): $v'_B = v - v_B$

Diese Regel funktioniert im Alltag sehr gut. Bei **Licht** funktioniert sie jedoch **nicht** mehr. Egal in welche Richtung ein Lichtstrahl ausgesendet wird, misst ein externer Beobachter immer:

$$v' = c$$

Unabhängig von der Bewegungsrichtung, die Lichtgeschwindigkeit bleibt immer konstant.

Zur Schreibweise: Größen mit Strich (Prime), wie v' oder Δt', sind die Größen, die von einem externen Beobachter gemessen werden, der das System in Bewegung sieht. Die nicht gestrichenen Größen gehören zum Ruhesystem, also zu einem Beobachter, der sich mit dem System mitbewegt.

1.3 Gedankenexperiment mit der Lichtuhr

Um die Folgen dieser Überlegungen besser zu verstehen, betrachtet man eine Lichtuhr. Diese besteht aus zwei Spiegeln mit dem Abstand L, zwischen denen ein Lichtstrahl hin und her reflektiert wird. Jeder Umlauf (Tick-Tack) entspricht einem Takt.

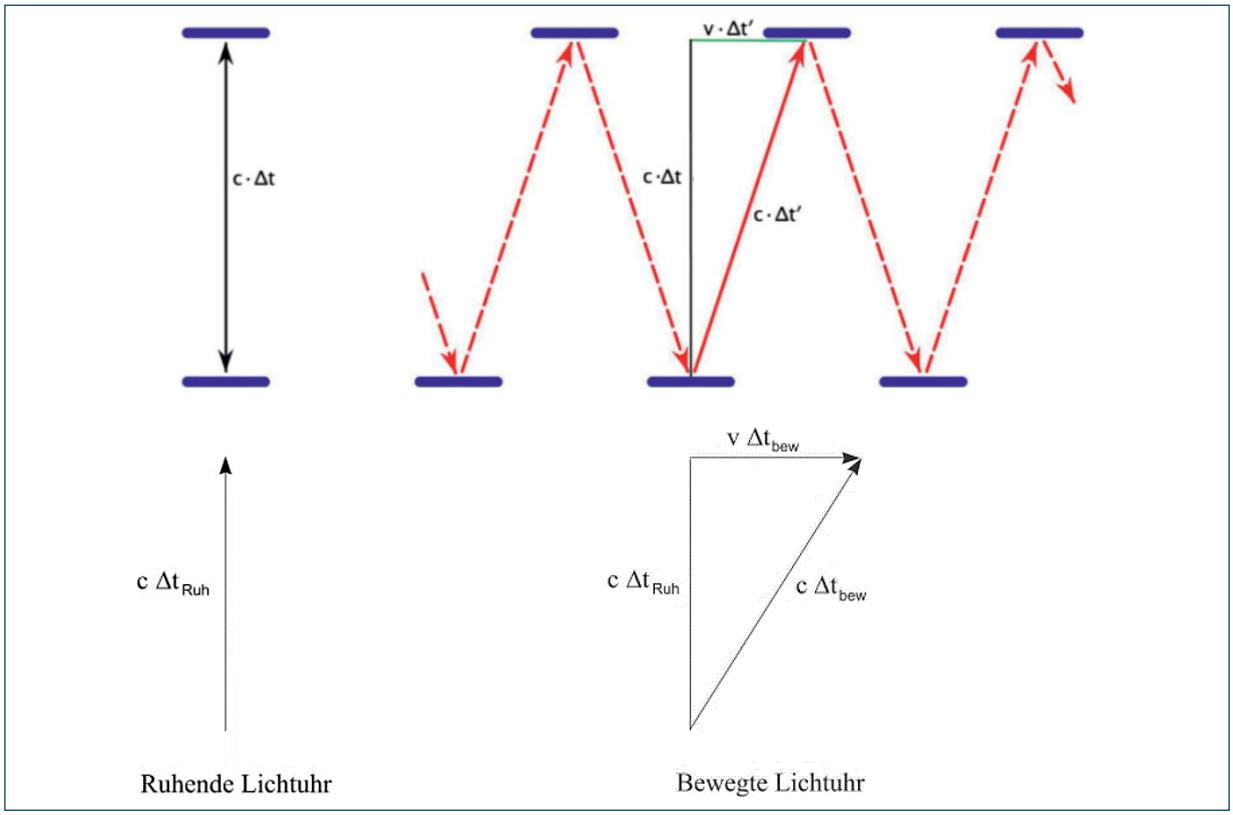
Im Ruhezustand der Uhr bewegt sich das Licht senkrecht zwischen den Spiegeln. Es gilt:

$$\mathrm{L} = \mathrm{c} \cdot \Delta\mathrm{t}$$

Bewegt sich die Uhr, so sieht ein externer Beobachter den Lichtstrahl nicht mehr senkrecht, sondern auf einer schrägen Bahn. Dadurch legt das Licht einen längeren Weg L' zurück (diagonal):

$$\mathrm{L}' > \mathrm{L}$$

Grafische Darstellung:



Da die Lichtgeschwindigkeit aber gleich bleiben muss und nicht größer als c werden kann, entsteht hier ein wichtiger Gedankenschritt. Wenn der Weg länger ist, die Geschwindigkeit aber gleich bleibt, dann muss die Zeitdauer größer sein. Das bedeutet:

$$\Delta t' > \Delta t$$

Einstein geht also davon aus, dass sich die Zeit für den externen Beobachter verändert.

Mit dem **Satz des Pythagoras** (siehe Anhang), ergibt sich der Zusammenhang:

$$(c \cdot \Delta t')^2 = (v \cdot \Delta t')^2 + (c \cdot \Delta t)^2$$

Teilt man durch c^2, erhält man:

$$(\Delta t')^2 = \frac{v^2}{c^2}(\Delta t')^2 + (\Delta t)^2$$

Umgestellt nach $(\Delta t')^2$, ergibt sich:

$$\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)(\Delta t')^2 = (\Delta t)^2$$

1.4 Zeitdilatation

Durch weiteres Umformen erhält man:

$$\boldsymbol{\Delta t' = \gamma \cdot \Delta t}$$

mit dem relativistischen Gamma-Faktor:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

Oft verwendet man auch die einfachere Schreibweise mit: $\boldsymbol{\beta = v/c}$

$$\boldsymbol{\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}}$$

Wichtig ist dabei (siehe Anhang):

$$\boldsymbol{\gamma \geq 1}$$

- Für $v = 0$. Gilt: $\gamma = 1$, es gibt also keinen Effekt;
- Wenn v gegen c geht, wächst γ sehr stark an ($\gamma \to \infty$).

Die Interpretation ist entscheidend:

$$\Delta t' = \gamma \cdot \Delta t \ \geq \ \Delta t$$

Eine bewegte Uhr läuft langsamer. Betrachtet man einen ganzen Takt, also Tick und Tack, ergibt sich:

$$\boldsymbol{T = \gamma \cdot T_0}$$

Dabei ist T_0 die Eigenzeit der Uhr und T die von außen gemessene Zeit. Der externe Beobachter misst also eine größere Zeitdauer, die Uhr scheint langsamer zu ticken.

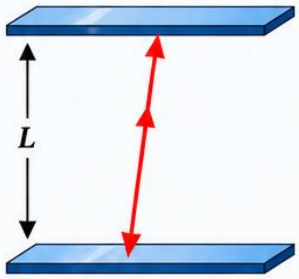
2. GEDANKENEXPERIMENT MIT DER LICHTUHR

Eine Lichtuhr zeigt: Bewegte Uhren gehen langsamer.

DIE LICHTUHR

Diese Lichtuhr besteht aus:

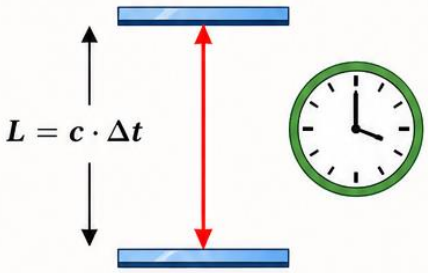
- Zwei horizontal angeordneten Spiegeln
- Spiegelabstand L
- Ein Lichtstrahl, der hin und her läuft (Tick–Tack)



Ein kompletter Tick (Tack) entspricht dem Hin- und Zurücklaufen des Lichtstrahls zwischen den Spiegeln.

GRAFISCHE DARSTELLUNG

IM ZUSTAND DER RUHE

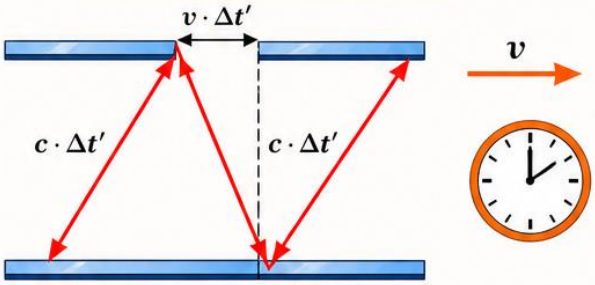


Der Lichtstrahl läuft senkrecht zwischen den Spiegeln hin und her.

Die Zeit für einen Tick (oder Tack) ist:

$$L = c \cdot \Delta t$$

IM ZUSTAND DER BEWEGUNG



Während die Uhr sich mit Geschwindigkeit v bewegt, legt das Licht einen längeren Weg L' zurück (diagonal).

Daher gilt: $L' > L$

MATHEMATISCHE HERLEITUNG

Mit dem Satz des Pythagoras gilt:

$$(c \cdot \Delta t')^2 = (v \cdot \Delta t')^2 + (c \cdot \Delta t)^2$$

Teilung durch c^2 :

$$(\Delta t')^2 = \frac{v^2}{c^2}\,(\Delta t')^2 + (\Delta t)^2$$

Umformung nach $(\Delta t')^2$:

$$\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)(\Delta t')^2 = (\Delta t)^2$$

Auflösung nach $\Delta t'$:

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma\,\Delta t$$

BEDEUTUNG

- Δt ... Zeitintervall der ruhenden Lichtuhr (Eigenzeit)
- $\Delta t'$ ... Zeitintervall der bewegten Lichtuhr (dilatiert)
- v ... Geschwindigkeit der Uhr relativ zum Beobachter
- c ... Lichtgeschwindigkeit ($\approx 3{,}00 \cdot 10^8$ m/s)
- γ ... Lorentzfaktor:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \geq 1$$

Da $\gamma \geq 1$, ist $\Delta t' \geq \Delta t$.

Bewegte Uhren gehen langsamer!

FAZIT:

Die Lichtuhr zeigt anschaulich, warum bewegte Uhren langsamer gehen: Der Lichtstrahl muss in der Bewegung einen längeren Weg zurücklegen, daher vergeht mehr Zeit für einen Tick.

ZEITDILATATION ist eine direkte Folge der Lichtgeschwindigkeit als oberste Grenzgeschwindigkeit in der Natur.

1.5 Längenkontraktion

Neben der Zeit verändert sich auch die gemessene Länge. Bewegte Objekte erscheinen in Bewegungsrichtung verkürzt:

$$\boldsymbol{L = \frac{L_0}{\gamma}}$$

Dabei ist L_0 die Ruhelänge und L die gemessene Länge im bewegten System.

Dieser Zusammenhang ergibt sich daraus, dass beide Beobachter dieselbe Geschwindigkeit messen müssen:

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\Delta x'}{\Delta t'} = v'$$

Setzt man $(\Delta t' = \gamma \cdot \Delta t)$ ein und berücksichtigt, dass für den externen Beobachter die Ruhelänge $(\Delta x' = L_0)$ gilt, ergibt sich:

$$\Delta x = \frac{\Delta x'}{\Delta t'} \cdot \Delta t = \frac{L_0}{\gamma \cdot \Delta t} \cdot \Delta t = \frac{L_0}{\gamma} = L$$

Für den externen Beobachter ist die Strecke also verkürzt.

Diese **Verkürzung** tritt **nur in Bewegungsrichtung** auf und wird als **Längenkontraktion** bezeichnet (oft auch *Lorentzkontraktion* genannt).

1.6 Wichtige Anmerkung

Bei der Verwendung dieser Größen ist es wichtig, die Bezugssysteme sauber zu unterscheiden. Die Eigenzeit T_0 gehört immer zu der Uhr, die sich im jeweiligen System in Ruhe befindet. Die Ruhelänge L_0 gehört zu dem Objekt oder Entfernung, welche in diesem System nicht bewegt sind.

Ein Beispiel macht das klarer. Bewegt sich ein Raumschiff relativ zur Erde, so ist seine Länge für den Astronauten die Ruhelänge L_0. Für einen Beobachter auf der Erde ist diese Länge verkürzt und beträgt: $L = L_0/\gamma$.

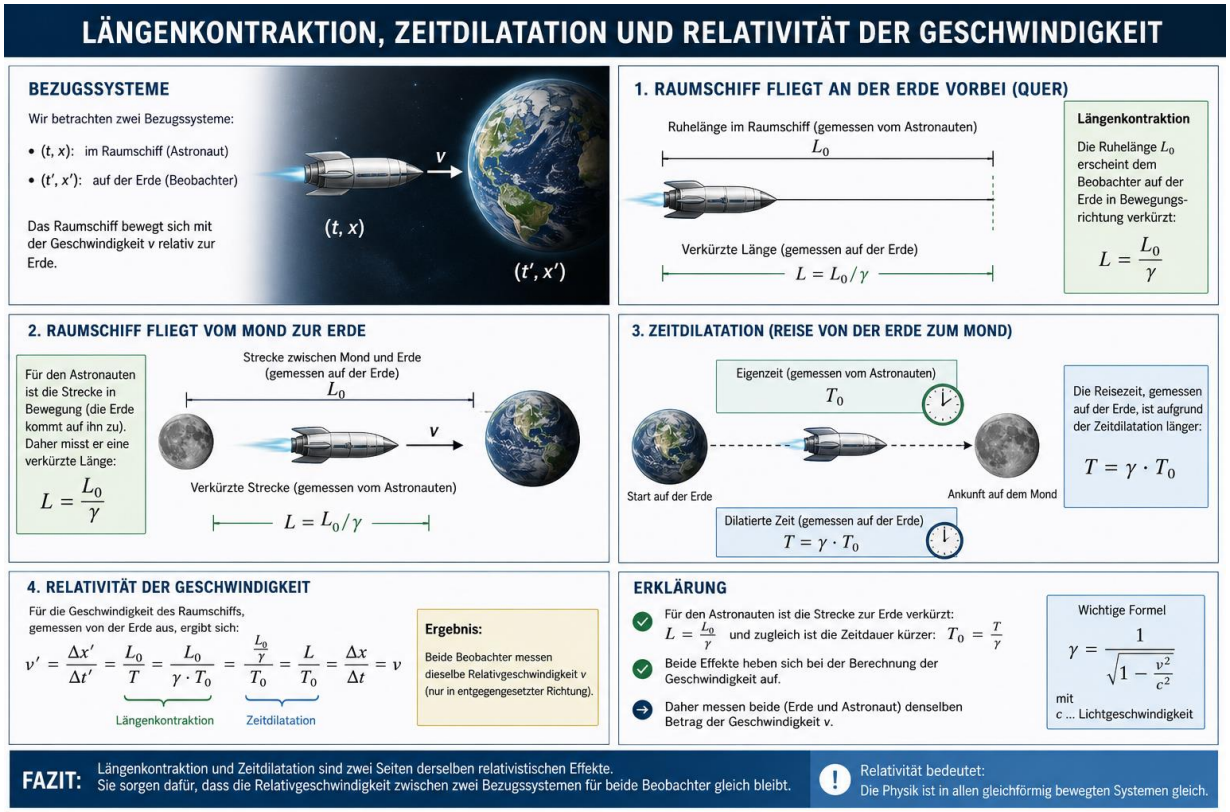
Betrachtet man dagegen die Strecke zwischen Erde und Mond, so ist diese für den Beobachter auf der Erde eine Ruhelänge. Für den Astronauten ist diese Strecke jedoch in Bewegung und erscheint verkürzt.

Auch bei der Zeit muss unterschieden werden. Misst der Astronaut für eine Reise die Eigenzeit T_0, so misst ein Beobachter auf der Erde aufgrund der Zeitdilatation eine um den Gamma-Faktor größere Zeit: $T = \gamma \cdot T_0$.

Trotz dieser Unterschiede ergibt sich für beide dieselbe Geschwindigkeit:

$$v' = \frac{\Delta x'}{\Delta t'} = \frac{L_0}{\gamma \cdot T_0} = \frac{L_0/\gamma}{T_0} = \frac{L}{T_0} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = v$$

Beide Beobachter kommen also auf denselben Wert für die Relativgeschwindigkeit.



1.7 Anwendung: Myonen auf der Erde

Ein besonders anschauliches Beispiel für diese Effekte liefern Myonen, die in der Atmosphäre durch kosmische Strahlung entstehen. Diese Teilchen haben eine sehr kurze Lebensdauer:

$$T_0 \approx 2{,}2\ \mu s$$

Rein klassisch betrachtet sollten sie die Erdoberfläche nicht erreichen.

Die Beobachtung zeigt jedoch, dass viele Myonen am Boden gemessen werden. Die Erklärung ergibt sich direkt aus der Relativitätstheorie.

- *Aus Sicht eines Beobachters auf der Erde* bewegen sich die Myonen fast mit Lichtgeschwindigkeit. Dadurch vergeht ihre Zeit langsamer, und sie leben länger, sodass sie die Erdoberfläche erreichen können.
- *Aus Sicht der Myonen* ist die Strecke zur Erde verkürzt: $L = L_0/\gamma$. Dadurch erreichen sie den Boden schneller.

Beide Sichtweisen führen zum gleichen Ergebnis und zeigen, dass die Effekte der Zeitdilatation und Längenkontraktion real und messbar sind.

MYONEN AUF DER ERDE

Ein eindrucksvolles Beispiel für die Zeitdilatation aus der Speziellen Relativitätstheorie

DAS PROBLEM

- Myonen entstehen in der Atmosphäre durch kosmische Strahlung.
- Sie leben nur sehr kurz:

$$T_0 \approx 2{,}2\ \mu s$$

- Eigentlich sollten sie nicht bis zur Erdoberfläche kommen.

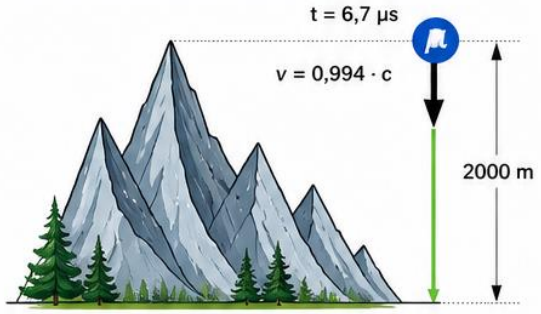
DIE BEOBACHTUNG

Wir messen jedoch tatsächlich sehr viele Myonen auf der Erdoberfläche!

Messung mit einem Myon-Detektor am Boden

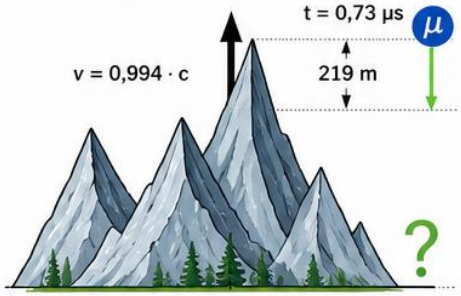
WIE SCHAFFT ES DAS MYON ZUR ERDE?

(a) Aus Sicht eines Beobachters auf der Erde



- Das Myon bewegt sich fast mit Lichtgeschwindigkeit.
- Aufgrund der Zeitdilatation vergeht für das Myon weniger Eigenzeit.
- In der verlängerten Zeit (aus unserer Sicht) erreicht es die Erde.

(b) Aus Sicht des Myons



- Die Strecke zur Erde ist aufgrund der Längenkontraktion verkürzt.
- Das Myon legt eine kürzere Strecke zurück.
- Deshalb erreicht es den Boden, bevor es zerfällt.

DIE ERKLÄRUNG: RELATIVITÄT!

Aus Sicht eines Beobachters auf der Erde:

- Myonen bewegen sich fast mit Lichtgeschwindigkeit ($v \approx 0{,}994 \cdot c$).
- Ihre Zeit läuft langsamer (Zeitdilatation).
- Sie „leben" länger und erreichen die Erdoberfläche.

Zeitdilatation:

$$\Delta t = \gamma\, \Delta\tau$$

mit

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Für $v = 0{,}994 \cdot c$ gilt:

$$\gamma \approx 10$$

Aus Sicht des Myons:

- Die Strecke zur Erde ist verkürzt (Längenkontraktion).
- Dadurch braucht es weniger Zeit, um den Boden zu erreichen.
- Es kommt an, bevor es zerfällt.

ZAHLENBEISPIEL (aus Sicht der Erde)

Eigenlebensdauer: $T_0 \approx 2{,}2\ \mu s$

Für $v = 0{,}994 \cdot c$: $\gamma \approx 10$

Mittlere Lebensdauer aus unserer Sicht:

$$T = \gamma\, T_0 \approx 10 \cdot 2{,}2\ \mu s = 22\ \mu s$$

In dieser Zeit kann das Myon die 2000 m Atmosphäre durchqueren und die Erde erreichen!

ZUSAMMENFASSUNG

- Myonen entstehen hoch in der Atmosphäre.
- Sie sind sehr kurzlebig ($\approx 2{,}2\ \mu s$).
- Durch Zeitdilatation und Längenkontraktion erreichen sie dennoch die Erdoberfläche.
- Die Beobachtung vieler Myonen ist ein starkes Argument für die Richtigkeit der Speziellen Relativitätstheorie!

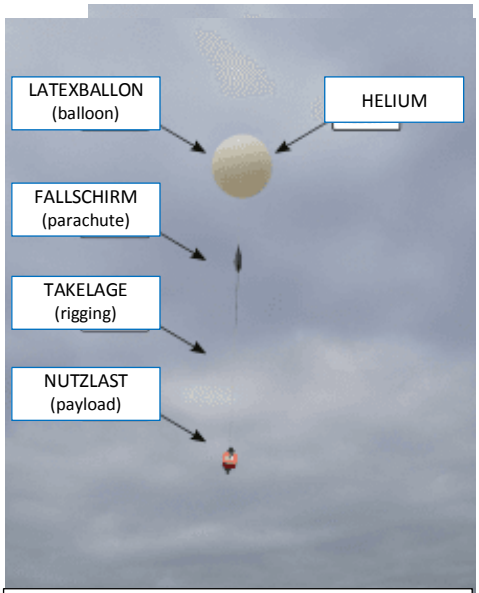
FAZIT: Die Myonen sind winzige Boten aus dem All, die uns zeigen: Raum und Zeit sind nicht absolut – sie hängen von der Bewegung ab!

2. Kapitel: Wetterballon-Guide: Grundlagen, Aufbau und Funktion

2.1 Einleitung

Wetterballons sind wissenschaftliche Messinstrumente, die zur Untersuchung der Atmosphäre eingesetzt werden. Sie steigen in große Höhen auf und liefern Daten über Temperatur, Luftdruck, Luftfeuchtigkeit und Wind. Diese Informationen sind wichtig für Wettervorhersagen und Klimaforschung.

Ein Wetterballon kann Höhen von etwa 20 bis 35 Kilometern erreichen, bevor er in der oberen Atmosphäre platzt. Während seines gesamten Fluges sendet er kontinuierlich Messdaten an die Erde. Dadurch entsteht ein detailliertes vertikales Profil der Atmosphäre, das zeigt, wie sich die Bedingungen mit zunehmender Höhe verändern.



Allgemeiner Aufbau eines Wetterballons

Platzen eines Wetterballons in der mittleren Stratosphäre (12–50 km)

Diese Daten sind besonders wichtig für numerische Wettermodelle. Diese Modelle berechnen das zukünftige Wetter mithilfe physikalischer Gleichungen. Je genauer die Messdaten aus der Atmosphäre sind, desto besser werden die Vorhersagen.

2.2 Physikalische Grundlage des Aufstiegs

Die **Gewichtskraft** auf der Erde ist die Kraft, mit der die Erde einen Körper aufgrund der Gravitation senkrecht nach unten zieht (Wechselwirkung der Massen). Ihre Größe lässt sich für einen Körper der Masse m mithilfe des Ortsfaktors g berechnen:

$$\boldsymbol{F_G = m \cdot g}$$

Der Ortsfaktor g entspricht der lokalen Fallbeschleunigung und beträgt auf der Erde näherungsweise:

$$g \approx 9{,}81\ \frac{\text{N}}{\text{kg}} = 9{,}81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Der Aufstieg eines Wetterballons basiert auf dem *archimedischen Prinzip des Auftriebs*.

Ein in einem Gas befindlicher Körper erfährt eine nach oben gerichtete Auftriebskraft, die dem Gewicht des verdrängten Gases entspricht. Übersteigt diese Auftriebskraft die Gewichtskraft des Körpers, so resultiert eine Nettokraft nach oben, wodurch der Ballon aufsteigt.

$$F_A = \rho_{Luft} \cdot V \cdot g$$

Hierbei ist ρ_{Luft} die Dichte der Luft und V das Volumen der vom Ballon verdrängten Luft. Die Masse dieser verdrängten Luft beträgt: $m_{Luft} = \rho_{Luft} \cdot V$.

Die entsprechende Gewichtskraft dieser Luft ergibt sich zu:

$$F_{G\ (verdrängte\ Luft)} = m_{Luft} \cdot g \equiv F_A$$

Diese Kraft entspricht effektiv der **Auftriebskraft**, die auf den Ballon nach oben wirkt.

Ihr entgegen wirkt die Gewichtskraft des Heliums (He) im Inneren des Ballons, wobei das Eigengewicht des Ballons zunächst vernachlässigt wird. Die Masse des Heliums lässt sich über seine Dichte bestimmen. Da das Heliumvolumen dem Ballonvolumen entspricht (die Dicke der Latexhülle wird vernachlässigt), gilt für die Gewichtskraft des Heliums:

$$F_{G\ (He)} = m_{He} \cdot g = \rho_{He} \cdot V \cdot g$$

Ein Aufstieg erfolgt, wenn die Auftriebskraft größer ist als die Gewichtskraft auf das Helium:

$$F_A > F_{G\ (He)}$$

Der Nettoauftrieb F_A' nach oben ergibt sich somit zu:

$$F_A' = F_A - F_{G\ (He)}$$

Noch genauer kann der Auftrieb durch den Dichteunterschied beschrieben werden:

$$F_A' = (\rho_{Luft} - \rho_{He}) \cdot V \cdot g$$

Der entscheidende physikalische Punkt ist, dass Helium deutlich weniger dicht ist als Luft. Dadurch ist die verdrängte Luft schwerer als das Gas im Ballon selbst, wodurch ein Nettoauftrieb entsteht.

In Wirklichkeit wirkt jedoch die nach oben gerichtete Auftriebskraft der Gewichtskraft aller mitgetragenen Massen entgegen. Dazu gehören sowohl die Masse des Heliums als auch alle weiteren Lasten, also die Latexhülle, der Fallschirm und die Schnüre (Takelage) sowie die gesamte Nutzlast.

$$F_G = m_{tot} \cdot g = F_{G\,(He)} + F_{G\,(Last)}$$

Dabei ist m_{tot} die gesamte mitgeführte Masse:

$$m_{tot} = m_{He} + m_{Last} = m_{He} + \left(m_{Latex} + m_{Fallschirm} + m_{\text{Takelage}} + m_{Nutzlast}\right)$$

Durch das Bilanzieren aller auf den Ballon wirkenden Kräfte kann mit der Grundgleichung der Mechanik die Dynamik des aufsteigenden Ballons beschrieben werden. Aus den so aufgestellten Bewegungsgleichungen lassen sich die zeitliche Entwicklung der Höhe sowie Geschwindigkeit und Beschleunigung des Ballons bestimmen. Diese Berechnungen wurden in unserer Gruppe als theoretische und numerische Arbeit von Noah durchgeführt.

Dabei darf der Luftwiderstand („Drag“) auf den Ballon nicht vernachlässigt werden. Gerade dieser Term macht die Berechnung deutlich komplexer, da die Gleichungen dadurch nicht mehr einfach analytisch lösbar sind.

$$F_D = \frac{1}{2}\rho_{Luft} \cdot C_D A \cdot v^2$$

Der Luftwiderstand hängt nicht nur vom Querschnitt A des Ballons ab, der während des Aufstiegs größer wird, sowie vom Formfaktor C_D, sondern auch von der lokalen Luftdichte ρ_{Luft}. Diese wiederum ist abhängig vom Luftdruck und von der Temperatur in den jeweils durchquerten Atmosphärenschichten.

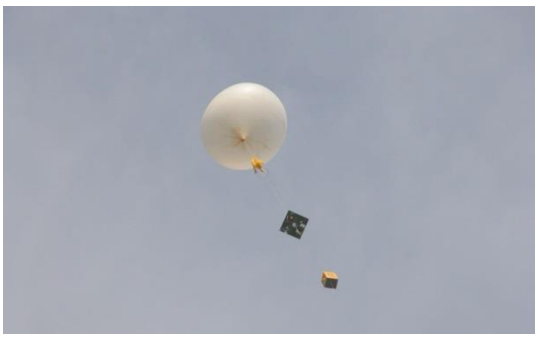
Besonders entscheidend ist die quadratische Abhängigkeit von der Geschwindigkeit v^2. Dadurch wird die Gleichung nichtlinear und muss numerisch gelöst werden. Genau das wurde von Noah umgesetzt, um unter anderem den Zeitpunkt und die Höhe des Platzens des Ballons vorherzusagen.

Ein Aufstieg erfolgt also nur dann, wenn gilt:

$$F_A > m_{tot} \cdot g + F_D$$

2.3 Aufbau eines Wetterballons

Ein Wetterballon besteht aus mehreren technischen Komponenten, die präzise zusammenarbeiten.



https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/54/Wetterballon_Nutzlast_Start_2004-09-10.jpg

2.3.1 Der Ballon

Der Ballon wird aus Latex oder synthetischem Gummi hergestellt. Dieses Material ist elastisch und kann sich stark dehnen, ohne sofort zu reißen.

Beim Start ist der Ballon nur teilweise mit Helium gefüllt. Während des Aufstiegs nimmt der Luftdruck in der Atmosphäre kontinuierlich ab. Dadurch kann sich das Helium im Inneren immer weiter ausdehnen.

Dieser Zusammenhang lässt sich mit dem Boyle-Mariotte-Gesetz beschreiben, wenn man vereinfacht von konstanter Temperatur (isothermer Zustand) und keinem Gasverlust ausgeht:

$$pV = konstant$$

Sinkt also der Druck, so muss das Volumen entsprechend größer werden. Das bedeutet, dass sich das Helium ausdehnt und damit auch der Ballon immer größer wird.

In großen Höhen kann der Ballon dadurch ein Vielfaches seiner ursprünglichen Größe erreichen, bis er schließlich platzt, da die Zugkraft seiner Haut dem Druckunterschied nicht mehr standhalten kann.

©Shane

2.3.2 Die Nutzlast

Die Nutzlast ist eine Messkapsel, die alle wichtigen Sensoren enthält. Diese messen kontinuierlich mit verschiedenen Messgeräten verschiedene Atmosphärenparameter:

- Temperatur
- Luftdruck
- Luftfeuchtigkeit
- GPS-Position

Die Kapsel besteht häufig aus Styropor, da dieses Material sehr leicht ist und gleichzeitig als Isolierung gegen extreme Kälte dient. In Höhen über 20 km können Temperaturen unter −60 °C auftreten.

Die Daten werden während des gesamten Fluges in Echtzeit auf einer SD-Karte gespeichert. Dadurch können wir nach der Bergung des Ballons den Verlauf des gesamten Aufstiegs und des anschließenden Sinkfluges genau nachvollziehen.

Zur Bergung und Ortung der Nutzlast nach der Fallschirmlandung befindet sich zusätzlich ein Ortungssender an Bord.

2.3.3 Seile und Fallschirm

Zwischen Ballon und Nutzlast befinden sich stabile, aber sehr leichte Seile aus Materialien wie Nylon oder Kevlar. Diese müssen gleichzeitig reißfest und flexibel sein.

Nach dem Platzen des Ballons wird automatisch ein Fallschirm aktiviert. Dieser sorgt dafür, dass die Nutzlast langsam absinkt und nicht unkontrolliert zur Erde fällt. Dadurch wird die empfindliche Elektronik geschützt.

2.4. Verhalten in der Atmosphäre

Während des Aufstiegs verändert sich die Umgebung stark.

Der Luftdruck nimmt mit zunehmender Höhe exponentiell ab, da die Luftmoleküle immer weiter auseinander liegen. Gleichzeitig sinkt die Temperatur in der Troposphäre im Mittel um etwa:

$T \approx -6{,}5\ °C$ pro km Höhe

Durch die Abnahme des Drucks sinkt auch die Luftdichte. Die Luft wird dadurch immer dünner und enthält weniger Teilchen pro Volumen. Trotzdem steigt der Ballon weiter auf, da sich das Gas im Inneren ausdehnt und der Auftrieb weiterhin wirkt.

Ab etwa 10 bis 15 km Höhe beginnt die Stratosphäre. In dieser Schicht verändert sich das Temperaturverhalten deutlich. Die Temperatur bleibt zunächst stabiler oder steigt sogar wieder leicht an (bis etwa 0 °C). Ursache dafür ist, dass das Ozon in dieser Region UV-Strahlung der Sonne absorbiert und die dabei aufgenommene Energie an die Umgebung abgibt.

2.5. Physikalische Gasgesetze

Das Verhalten des Heliums im Ballon lässt sich durch das allgemeine ideale Gasgesetz beschreiben:

$$\boldsymbol{pV = nRT}$$

Dabei gelten:

- p = Druck (in Pa = N/m²)
- V = Volumen (in m³)
- T = Temperatur (in K)
- n = Stoffmenge (in mol)
- R = Gaskonstante, mit: R = 8,314 J/K/mol

Ein Spezialfall dieses Gesetzes ist das bereits erwähnte Boyle-Mariotte-Gesetz. Es ergibt sich, wenn die Stoffmenge im Ballon erhalten bleibt (n_{He} = konstant) und zusätzlich isotherme Bedingungen vorliegen (T = konstant): $pV = konstant$

Die Stoffmenge n lässt sich über die molare Masse M (in kg/mol) mit der Masse des Gases verknüpfen. Es gilt: $m = n \cdot M$

Damit kann man das ideale Gasgesetz auch in eine Form bringen, die direkt die Dichte beschreibt. Ausgangspunkt ist:

$$pV = nRT = nM\left(\frac{R}{M}\right)T = m \cdot R^*T$$

Hier fasst man den Term (R/M) oft zu einer spezifischen Gaskonstante R^* zusammen:

Damit ergibt sich die bekannte Zustandsgleichung:

$$p = \frac{m}{V}R^*T \equiv \rho\, R^*T$$

und umgestellt für die Dchte: $\boldsymbol{\rho = \frac{p}{R^*T}}$

Diese Beziehung zeigt sehr klar, dass Druck, Temperatur und Dichte direkt miteinander verknüpft sind. Besonders wichtig für den Ballon ist dabei, dass bei sinkendem Druck das Volumen stark zunimmt und gleichzeitig die Dichte des Heliums abnimmt: $\rho_{He} = \frac{m_{He}}{V}$

Da m_{He} konstant bleibt, folgt daraus direkt: $\rho_{He} \sim \frac{p}{T}$

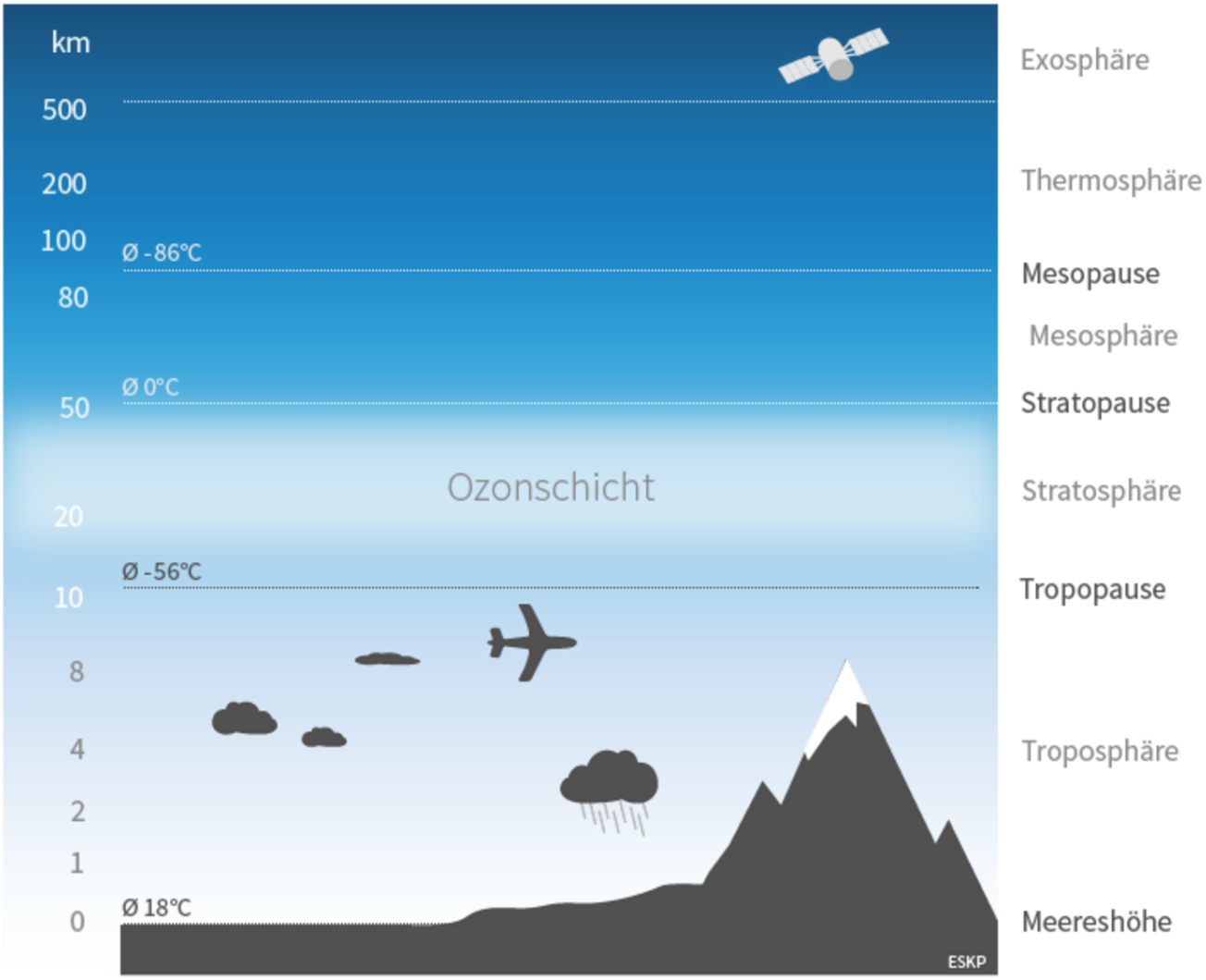
Damit wird verständlich, warum sich das Helium beim Aufstieg immer weiter ausdehnt und der Ballon sein Volumen stark vergrößert.

2.6 Temperatur- und Druckverlauf

Mit zunehmender Höhe sinkt der Luftdruck stark. Dieser Abfall ist nicht linear, sondern exponentiell. Gleichzeitig nimmt die Temperatur in der Troposphäre deutlich ab, bis etwa −56 °C. In der Stratosphäre steigt sie anschließend wieder leicht an, bis ungefähr 0 °C.

Die abnehmende Luftdichte bedeutet, dass immer weniger Luftteilchen auf den Ballon wirken. Dadurch wird der äußere Druck zunehmend geringer.

Trotz dieser Veränderungen bleibt der Aufstieg stabil, da das Heliumvolumen im Inneren kontinuierlich wächst und der Auftrieb dadurch erhalten bleibt.



Atmosphäre der Erde – ESKP (Wissenschaftsplattform Erde und Umwelt):

https://www.eskp.de/grundlagen/schadstoffe/atmosphaere-der-erde-935158/

2.7 Höhe des Platzens

Der Wetterballon dehnt sich während des Aufstiegs immer weiter aus, bis das Material seine physikalische Grenze erreicht.

Typischerweise platzen Wetterballons in einer Höhe zwischen 20 km und 35 km. Diese Höhe hängt von mehreren Faktoren ab, die sich gegenseitig beeinflussen.

Wichtige Einflussgrößen sind:

- die Menge des Heliums beim Start, also indirekt die Startgröße des Ballons,
- die Elastizität des Ballonmaterials und damit seine mechanische Belastbarkeit,
- die Temperatur der Umgebung,
- sowie der Unterschied zwischen Innen- und Außendruck.

Wenn die Zugspannung im Material zu groß wird, kann die elastische Hülle nicht mehr stabil bleiben und der Ballon reißt abrupt.

2.8. Rückkehr zur Erde

Nach dem Platzen des Ballons öffnet sich automatisch ein Fallschirm. Dieser sorgt dafür, dass die Fallgeschwindigkeit der Nutzlast stark reduziert wird.

Die Kapsel sinkt anschließend kontrolliert zur Erde zurück. Dabei werden weiterhin Messdaten gespeichert und zusätzlich Signale zur Ortung gesendet. Diese Daten sind besonders wertvoll, da sie auch Informationen aus sehr großen Höhen enthalten und den gesamten Höhenverlauf des Fluges vollständig rekonstruierbar machen.

Nach der Landung wird die Kapsel mithilfe des Ortungssignals wiedergefunden und kann häufig erneut verwendet werden. Dadurch sind Wetterballons relativ kosteneffiziente und nachhaltige Messsysteme, da im Wesentlichen nur der Ballon und das Helium ersetzt werden müssen.

3.Kapitel: Messgeräte

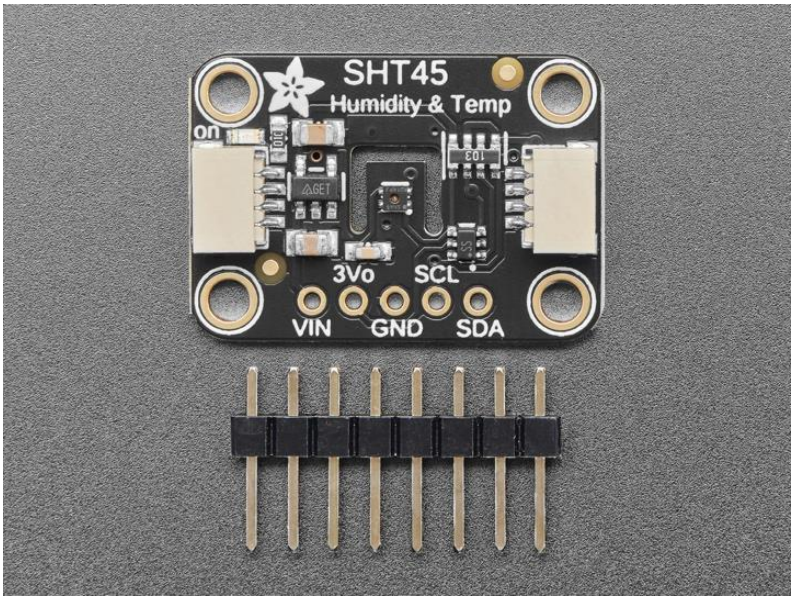
Ein Temperatursensor ist ein wichtiger Bestandteil eines Wetterballons, da er dabei hilft zu messen, wie sich die Temperatur mit zunehmender Höhe verändert. In der Atmosphäre nimmt die Temperatur nicht gleichmäßig ab, sondern verändert sich je nach Luftschicht unterschiedlich.

Durch die Messungen des Sensors lassen sich diese Veränderungen nachvollziehen und besser verstehen. Die gesammelten Daten sind wichtig, um Einblicke in den Aufbau der Atmosphäre zu bekommen.

3.1 Temperatursensor SHT45 von Adafruit

3.1.1 Einleitung

Der SHT45 ist ein digitaler Sensor zur Messung von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit. Er gehört zur SHT4x-Serie des Herstellers *Sensirion* und gilt als das genaueste Modell dieser Reihe. In der Praxis wird er häufig in Projekten eingesetzt, bei denen zuverlässige Umweltdaten benötigt werden, zum Beispiel in Smart-Home-Systemen oder bei selbstgebauten Wetterstationen. Durch seine kompakte Bauweise und einfache Nutzung ist er sowohl für Einsteiger als auch für fortgeschrittene Anwender geeignet.



https://www.adafruit.com/product/5665?srsltid=AfmBOorDPBlvTcZ-DleAzGi0sSDFWzt7Udk80y-MdVf1xKswbKNr_BLR

3.1.2 Messgenauigkeit und Leistungsfähigkeit

Ein großer Vorteil des SHT45 ist sein Einsatzbereich von −55 °C bis 125 °C.

Ein zusätzlicher Vorteil ist seine hohe Genauigkeit. Die Luftfeuchtigkeit wird mit etwa ±1 % gemessen, während die Temperatur mit einer Genauigkeit von ± 0,1 °C erfasst wird. Diese Werte sind für viele Anwendungen mehr als ausreichend und ermöglichen sehr präzise Messungen.

Besonders bei längeren Messreihen zeigt sich, dass der Sensor stabile und zuverlässige Ergebnisse liefert. Dadurch eignet er sich für Projekte, bei denen genaue Daten entscheidend sind.

3.1.3 Technische Schnittstelle

Der Sensor nutzt die sogenannte I2C-Schnittstelle zur Kommunikation. Das bedeutet, dass nur zwei Leitungen für die Datenübertragung benötigt werden: eine für das Taktsignal (SCL) und eine für die Daten (SDA). Zusätzlich werden Strom und Masse angeschlossen. Die Adresse des Sensors ist fest auf 0x44 eingestellt. Das vereinfacht die Nutzung, kann aber bei mehreren Sensoren zu Einschränkungen führen.

3.1.4 Spannungsversorgung und Kompatibilität

Der SHT45 kann sowohl mit 3,3 Volt als auch mit 5 Volt betrieben werden. Dadurch ist er mit vielen verschiedenen Geräten kompatibel, zum Beispiel mit Arduino oder Raspberry Pi. Diese Flexibilität macht es einfach, den Sensor in unterschiedliche Projekte einzubauen, ohne viel anpassen zu müssen.

3.1.5 Software und Anwendung

Die Nutzung des Sensors wird durch vorhandene Bibliotheken stark vereinfacht. Diese ermöglichen es, Messwerte schnell und unkompliziert auszulesen. Auch ohne tiefgehende Programmierkenntnisse kann der Sensor relativ einfach eingesetzt werden.

Wir haben ihn so programmiert, dass er in regelmäßigen Abständen von 1 Sekunde Temperatur und Luftfeuchtigkeit misst und die Daten anschließend ausgibt bzw. speichert. Das verwendete Programm kann im Anhang eingesehen werden.

3.1.6 Zusatzfunktionen

Der SHT45 bietet verschiedene Einstellungen, die an die jeweilige Anwendung angepasst werden können. Dazu gehören unterschiedliche Genauigkeitsstufen, die beeinflussen, wie schnell und präzise gemessen wird. Außerdem verfügt der Sensor über eine integrierte Heizfunktion. Diese kann genutzt werden, um Kondensation zu verhindern und die Messgenauigkeit in feuchten Umgebungen zu verbessern.

Für anspruchsvollere Einsatzorte gibt es den Sensor auch mit einer speziellen Schutzmembran. Diese schützt vor Staub, Schmutz und Feuchtigkeit. Dadurch kann der SHT45 auch unter schwierigeren Bedingungen eingesetzt werden, ohne dass die Messwerte stark beeinträchtigt werden.

3.2 Absoluter Luftdrucksensor MPRLS

Der Drucksensor wird im Projekt verwendet, um den Luftdruck während des Aufstiegs des Wetterballons zu messen. Da der Luftdruck mit zunehmender Höhe stark abnimmt, kann mithilfe dieser Messwerte die Höhe des Ballons bestimmt und der Aufbau der Atmosphäre analysiert werden. Die gesammelten Daten sind besonders wichtig, um Veränderungen in der Atmosphäre besser zu verstehen.

In unserem Fall verwenden wir den **MPRLS Drucksensor von Adafruit**, der präzise Druckmessungen ermöglicht.

https://cdn-shop.adafruit.com/970x728/3965-04.jpg

3.2.1 Einleitung

Der MPRLS ist ein digitaler Drucksensor, der zur Messung von absolutem Druck eingesetzt wird. Er wird häufig in wissenschaftlichen und technischen Anwendungen verwendet, bei denen genaue Druckdaten benötigt werden.

Dank seiner kompakten Konstruktion sowie der benutzerfreundlichen Bedienbarkeit ist das System besonders für den Einsatz in experimentellen Projekten, wie unserer Wetterballonmission, geeignet.

3.2.2 Messgenauigkeit und Leistungsfähigkeit

Der Sensor bietet eine hohe Messgenauigkeit und arbeitet in einem Bereich von **0 bis 25 PSI**.

Er verfügt über einen integrierten **24-Bit-Analog-Digital-Wandler**, wodurch sehr präzise Messwerte erzeugt werden. Dies ist besonders wichtig für die genaue Bestimmung von Höhenunterschieden.

Der Sensor misst den Druck mithilfe eines empfindlichen Messelements. Druckänderungen werden in elektrische Signale umgewandelt und digital ausgegeben.

Der Sensor ist bereits kalibriert und temperaturkompensiert, wodurch zuverlässige Messwerte ohne zusätzliche Anpassungen möglich sind.

3.2.3 Technische Schnittstelle

Der MPRLS nutzt ebenfalls die I²C-Schnittstelle zur Kommunikation. Dadurch werden nur wenige Verbindungen benötigt:

- SCL (Taktsignal)
- SDA (Datenleitung)

Zusätzlich werden Strom (VCC) und Masse (GND) angeschlossen.

Die I²C-Adresse ist **0x18**.

3.2.4 Spannungsversorgung und Kompatibilität

Der Sensor kann mit **3,3 V bis 5 V** betrieben werden und ist damit kompatibel mit vielen Mikrocontrollern wie Arduino oder Raspberry Pi.

Dies erleichtert den Einsatz in verschiedenen Projekten erheblich.

3.2.5 Software und Anwendung

Für den Sensor stehen Bibliotheken zur Verfügung, mit denen die Messwerte einfach ausgelesen werden können.

Im Projekt wird der Luftdruck in regelmäßigen Abständen gemessen und gespeichert. Diese Daten können später zur Analyse der Atmosphäre genutzt werden.

3.2.6 Zusatzfunktionen

Der Sensor besitzt zusätzliche Pins wie **RST (Reset)** und **EOC (End of Conversion)**. Diese ermöglichen eine erweiterte Steuerung und genaues Timing der Messungen.

Der MPRLS verfügt über einen stabilen Metallanschluss, an den ein Schlauch angeschlossen werden kann. Dadurch ist er gut geschützt und kann auch unter anspruchsvollen Bedingungen eingesetzt werden.

3.2.7 Einsatz im Projekt

Im Wetterballon-Projekt wird der MPRLS verwendet, um den Luftdruck während des Aufstiegs zu messen.

Da der Luftdruck mit zunehmender Höhe abnimmt, können aus den Messwerten Rückschlüsse auf die aktuelle Höhe des Ballons gezogen werden.

Diese Daten sind entscheidend für die Analyse der Atmosphäre und ergänzen die Messwerte des Temperatursensors.

4.Kapitel: Testversuche

4.1 Konzeption und Aufbau des Experiments

Test eines Arduino-Programms zur Messung von Temperatur und Luftfeuchtigkeit in Abhängigkeit von Wärmestrahlung

4.1.1 Ziel des ersten Testversuchs

Ziel des **Testversuchs** ist es, ein selbst entwickeltes Programm auf einem Arduino zu testen, welches die Messwerte eines **SHT45** erfasst und ausgibt. Dabei wird untersucht, wie sich Temperatur und Luftfeuchtigkeit in Abhängigkeit vom Abstand zu einer Wärmequelle verändern. Der Fokus liegt sowohl auf der physikalischen Beobachtung als auch auf der Überprüfung der korrekten Funktion des Programms.

4.1.2 Komponenten des Versuchs

a) Arduino - Mikrocontroller

Der Arduino übernimmt:

- das Auslesen der Sensordaten über die I²C-Schnittstelle
- die Verarbeitung im Programm
- die Ausgabe der Werte an einen Laptop über USB

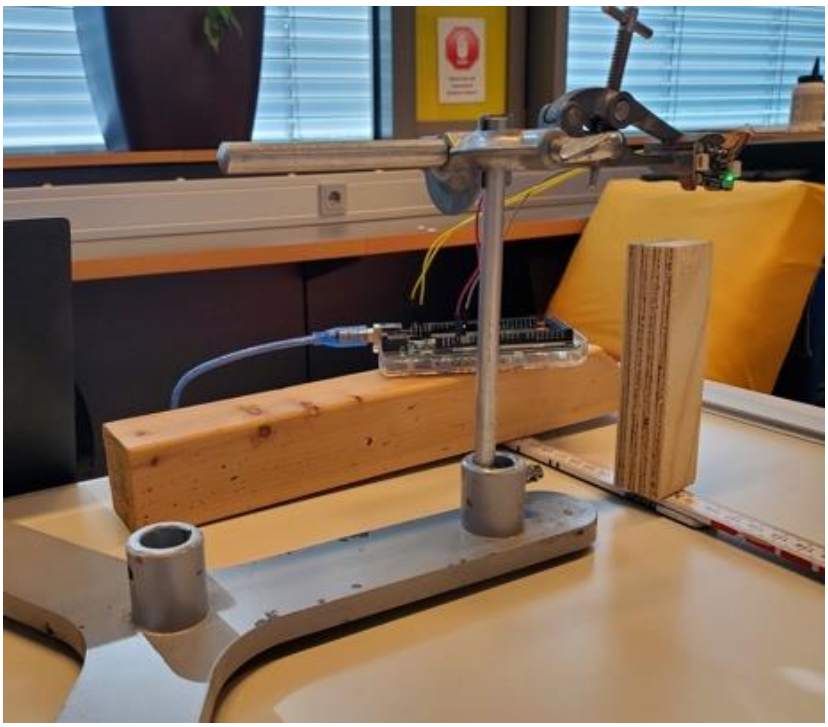
©Shane

b) Sensor - SHT45

Der Sensor misst:

- Temperatur (°C)
- relative Luftfeuchtigkeit (%)

Er ist so positioniert, dass er die Umgebungsbedingungen im Einflussbereich der Wärmequelle erfasst.



©Shane

c) Stativfuß mit Klemme

Anstelle eines mechanischen Arms wird ein **Stativfuß mit Klemme** verwendet. Dieser erfüllt eine zentrale Funktion:

- stabile Befestigung des Sensors
- flexible Positionierung im Raum
- präzises Einstellen der Höhe und Ausrichtung

d) Halogenstrahler (Wärmequelle)

Ein Halogenstrahler dient als externe Wärmequelle. Er erzeugt:

- intensive Wärmestrahlung
- gerichtete Energieabgabe

Der Strahler ist fest positioniert und auf den Sensor ausgerichtet, sodass gezielte Temperaturänderungen erzeugt werden können.

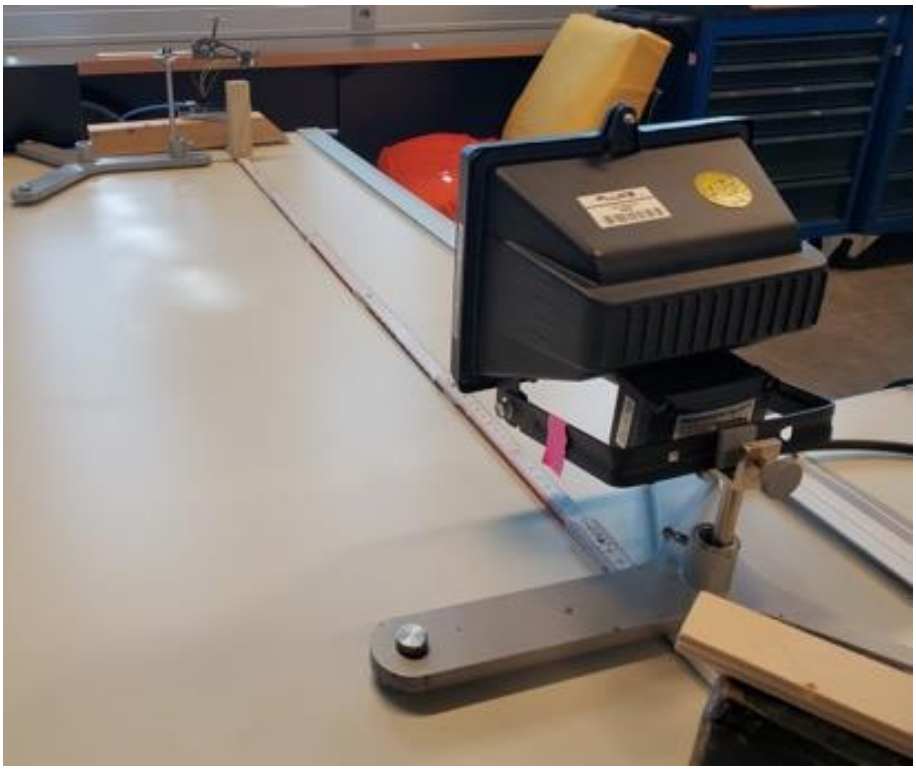
©Shane

d) Maßband

Das Maßband ist entlang der Versuchsanordnung ausgelegt und ermöglicht:

- exakte Bestimmung des Abstands zwischen Sensor und Strahler
- systematische Variation der Messbedingungen
- Vergleichbarkeit der Ergebnisse

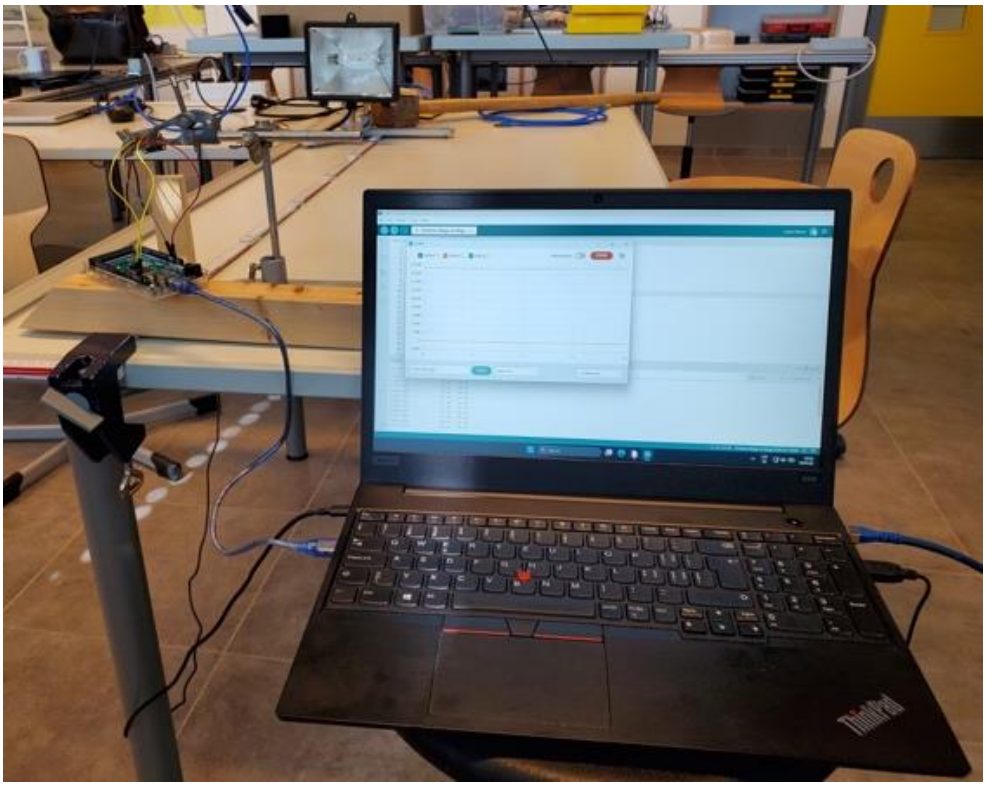
Typische Abstände sind z. B. 10 cm, 20 cm, 30 cm usw.


©Shane

e) Laptop

Der Laptop ist über USB mit dem Arduino verbunden und dient zur:

- Übertragung des Programms
- Anzeige der Messwerte (serieller Monitor)
- Kontrolle und Dokumentation des Versuchs



©Shane

4.1.2 Versuchsablauf

1. **Kontrolle:**
   Arduino starten und prüfen, ob das Programm korrekt läuft (Anzeige der Raumwerte).
2. **Referenzmessung:**
   Messung ohne eingeschalteten Strahler durchführen.
3. **Abstand einstellen:**
   Mithilfe des Maßbands einen definierten Abstand festlegen (z. B. 20 cm).
4. **Messung mit Wärmeeinfluss:**
   Halogenstrahler einschalten und Messwerte über Zeit beobachten.
5. **Variation des Abstands:**
   Halogen Lampe schrittweise näher zum Sensor positionieren.

4.1.3 Erste Beobachtungen

- Temperatur steigt bei geringerem Abstand zum Strahler
- Luftfeuchtigkeit sinkt mit steigender Temperatur
- Messwerte ändern sich kontinuierlich → Hinweis auf funktionierendes Programm
- Verzögerung der Messung zeigt Reaktionszeit des Sensors

©Shane

4.2 Quantitativer Versuch und Auswertung

4.2.1 Ausgangsidee und erster Versuch

Wir wollen nun genau herausfinden, wie sich die Temperatur verändert, wenn man eine Lichtquelle Schritt für Schritt näher an einen Sensor bringt. Dafür haben wir den Halogenscheinwerfer alle 10 s um 5 cm näher an den Sensirion SHT45 herangeführt. Der Startabstand lag bei 100 cm. Währenddessen wurde jede Sekunde die Temperatur gemessen.

Ziel ist es ein experimentelles Gesetz herzuleiten, eine Formel, mit der die Temperatur in Abhängigkeit der radialen Distanz (r) vom Strahler zum Sensor bestimmt werden kann, also:

$$T = T(r)$$

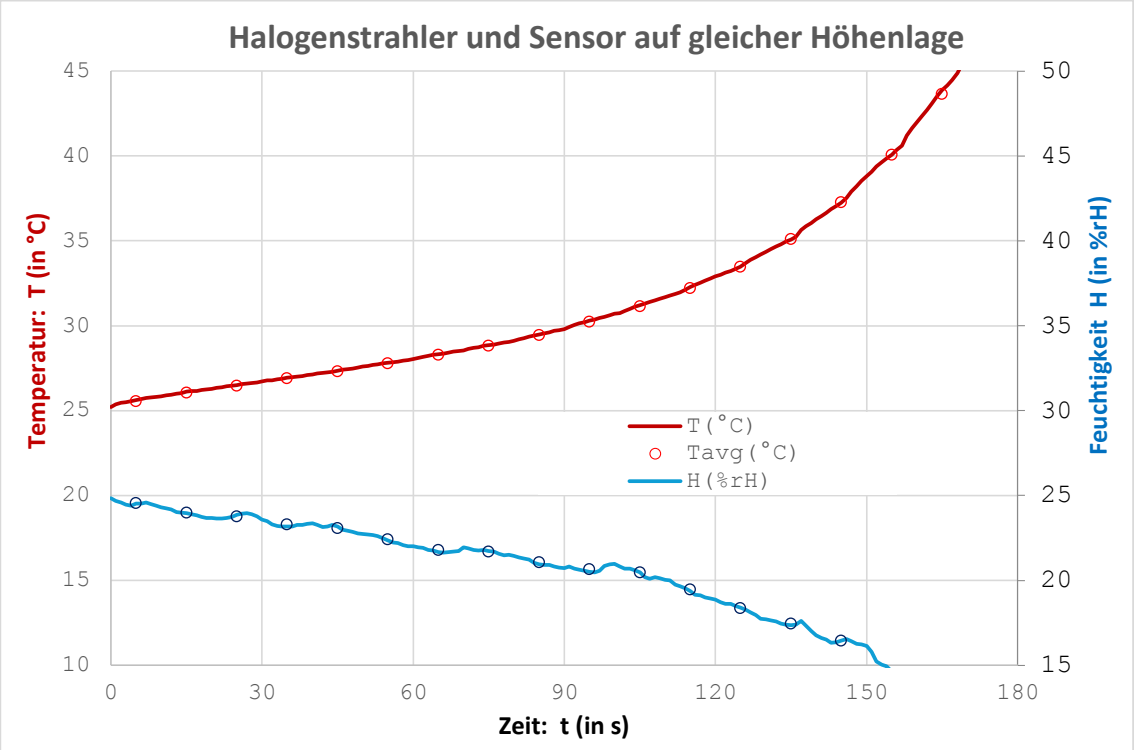
Als wir uns die ersten Daten angeschaut haben, ist uns etwas aufgefallen das wir so nicht erwartet hatten. Obwohl wir die Lampe nur alle 10 s bewegt haben, hat die Temperatur keine Sprünge gezeigt. Stattdessen ist sie ganz gleichmäßig angestiegen. Das war unser erster Hinweis darauf, dass hier etwas anders abläuft, als wir zunächst gedacht hatten.

4.2.2 Erste Auswertung und Umgang mit den Daten

Die Messdaten haben wir aus dem Arduino-Monitor in Microsoft Excel übertragen. Dort mussten wir sie zuerst anpassen, weil die Zahlen mit Dezimalpunkt gespeichert waren. Danach haben wir überlegt, wie wir die vielen Einzelmessungen sinnvoll zusammenfassen können.

Da jede Position der Lampe genau 10 Messwerte hatte, lag es nahe, diese zusammenzufassen. Wir haben dafür einen Index verwendet, der sich aus der Zeit ergibt, und daraus die jeweilige Entfernung berechnet. So konnten wir jedem 10 s Block eine feste Distanz zuordnen.

Zuerst haben wir einfach Mittelwerte gebildet. Später kam noch der Median dazu, weil wir gemerkt haben, dass einzelne Messwerte manchmal etwas „ausreißen“, zum Beispiel durch Luftbewegung. Der Median ist in solchen Fällen stabiler. Schon hier haben wir gelernt, dass die Art der Auswertung einen großen Einfluss auf das Ergebnis haben kann.



4.2.3. Warum gibt es keine Temperatursprünge?

Die gleichmäßige Kurve hat uns weiter beschäftigt. Eigentlich hätten wir erwartet, dass die Temperatur in Stufen ansteigt, passend zu den Bewegungen der Lampe. Dass das nicht passiert ist, hat uns dazu gebracht, den Sensor genauer zu hinterfragen.

Dabei wurde klar, dass der Sensor nicht direkt die Wärmestrahlung misst. Stattdessen misst er die Temperatur der Luft um ihn herum. Die Lampe erwärmt also zuerst die Luft, und diese Wärme breitet sich dann langsam aus. Dadurch entsteht ein kontinuierlicher Temperaturanstieg.

Das war eine wichtige Erkenntnis, weil wir gemerkt haben, dass wir nicht direkt das messen, was wir ursprünglich im Kopf hatten. Genau aus diesem „Fehler“ haben wir aber viel gelernt.

4.2.4 Suche nach einem physikalischen Zusammenhang

Nachdem wir die Daten bereinigt hatten, wollten wir wissen, ob es ein Gesetz gibt, das beschreibt, wie die Temperatur von der Entfernung abhängt.

In der Literatur, in Erklärvideos, aber auch in ChatGPT haben wir gesehen, dass bei einer Punktquelle die Intensität mit dem Quadrat der Entfernung abnimmt. Interessanter war für uns aber die Frage, wie man überhaupt auf dieses Gesetz kommt.

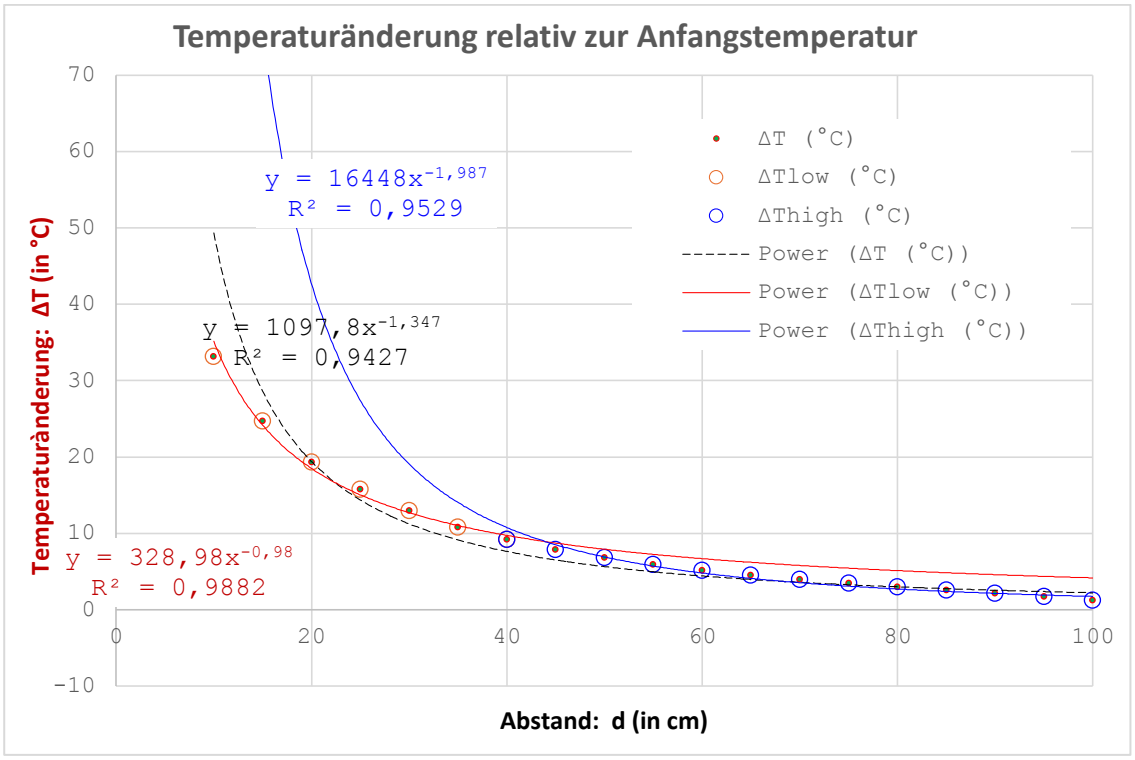
Man kann sich vorstellen, dass die Lichtquelle ihre Energie gleichmäßig in alle Richtungen abstrahlt. Diese Energie verschwindet nicht, sondern verteilt sich einfach im Raum. Betrachtet man nun eine bestimmte Entfernung, kann man sich eine Kugel um die Lichtquelle denken. Auf dieser Kugeloberfläche verteilt sich die gesamte abgestrahlte Energie.

Je weiter man sich von der Quelle entfernt, desto größer wird diese Kugel. Die Fläche einer Kugel wächst mit r^2 (die Kugeloberfläche beträgt genau: $A = 4\pi r^2$). Das bedeutet, dass sich die gleiche Energiemenge auf eine immer größere Fläche verteilt. Wenn sich die Fläche zum Beispiel vervierfacht, dann bekommt jeder Teil dieser Fläche nur noch ein Viertel der Energie ab.

$$I \sim 1/r^2$$

Genau deshalb nimmt die Lichtintensität I mit dem Quadrat der Entfernung ab.

Also haben wir versucht, unsere Daten damit zu vergleichen. Dazu haben wir in Excel die Funktion „Trendlinie“ mit der Option „Potenz“ verwendet. Diese nutzt als Ausgleichskurve eine Potenzfunktion der Form x^p und bestimmt den bestmöglichen Exponenten p, sodass die Kurve den Messwerten möglichst nahekommt. Dabei haben wir jedoch schnell festgestellt, dass diese Anpassung nicht in allen Bereichen gut passt (siehe schwarz gestrichelte Kurve in der Grafik).



Dann haben wir uns die Form unserer Lichtquelle genauer angeschaut. Die Halogenlampe ist kein Punkt, sondern eher ein länglicher Stab. Das hat uns auf die Idee gebracht, dass sie sich vielleicht eher wie eine Linienquelle verhält.

Für so eine Quelle gilt näherungsweise: $I \sim 1/r$

Damit konnten wir unsere Daten deutlich besser erklären, zumindest für kleinere Abstände.

4.2.5 Ein wichtiger Zwischenschritt

Wir haben dann nicht mehr direkt mit der Temperatur gearbeitet, sondern mit der Temperaturdifferenz zur Anfangstemperatur, also ($\Delta T = T - T_0$). Dadurch haben wir nur noch die Erwärmung betrachtet, die wirklich durch die Lampe verursacht wurde.

Als wir die Daten geplottet und mit Trendlinien versehen haben, kam etwas sehr Interessantes heraus. Je nach Bereich ergaben sich Exponenten von ungefähr -0,98 und -2,02 (siehe Grafikangaben). Das passt ziemlich genau zu den theoretischen Werten für ($1/r = r^{-1}$) und ($1/r^2 = r^{-2}$).

Hier wurde deutlich, dass beide Modelle stimmen können, aber in unterschiedlichen Bereichen. In größerer Entfernung verhält sich die Lampe wie eine Punktquelle, während sie in der Nähe eher wie eine ausgedehnte Quelle wirkt.

2.2.6 Neue Idee: Kann man die Entfernung zurückberechnen?

Nachdem wir den Zusammenhang zwischen Temperatur und Entfernung hatten, kam die nächste Frage fast automatisch. Wenn wir wissen, wie die Temperatur von der Entfernung abhängt, können wir dann auch umgekehrt aus der Temperatur auf die Entfernung schließen?

Um das zu testen, haben wir für feste Abstände von 80 cm, 50 cm und 20 cm jeweils neue Messungen gemacht und daraus wieder Mittelwerte gebildet. Diese Werte haben wir dann in unsere vorher bestimmte Kurve eingesetzt und daraus die Entfernung berechnet.

Das hat erstaunlich gut funktioniert. Dadurch haben wir verstanden, dass unsere Kurve im Prinzip eine Kalibrierung ist. Wenn die Funktion eindeutig ist, kann man sie auch umkehren.

2.2.7 Bezug zu einem realen Beispiel beim Stratoflight

Diese Erkenntnis hat uns an ein bekanntes physikalisches Prinzip erinnert, das wir im Zusammenhang mit unserem Stratoflight-Projekt bereits verwendet haben: den Zusammenhang zwischen Luftdruck und Höhe. Der Druck hängt von der Höhe ab. Wenn man also weiß, wie sich der Druck mit der Höhe verändert, kann man aus einem gemessenen Druckwert die Höhe bestimmen.

In der Atmosphäre nimmt der Luftdruck mit zunehmender Höhe ab. Dieser Zusammenhang ist nicht nur qualitativ bekannt, sondern kann auch mathematisch beschrieben werden durch die barometrische Höhenformel, die den Druck als Funktion der Höhe angibt. Damit gilt grundsätzlich: Wenn der Zusammenhang p(h) bekannt ist, lässt sich die Höhe auch eindeutig aus einem gemessenen Druckwert bestimmen.

$p = p(h)$ und damit umkehrbar: $h = h(p)$

Unser Versuch funktioniert nach genau dem gleichen Prinzip. Wir messen eine physikalische Größe, in unserem Fall die Temperatur, und können daraus über die zuvor bestimmte Kalibrierfunktion auf die Entfernung schließen. Das bedeutet, dass eine gemessene Größe nicht nur beobachtet wird, sondern als Grundlage dient, um eine zweite, eigentlich gesuchte Größe zu bestimmen.

Damit wird klar, dass unser Versuch im Kern das gleiche Prinzip nutzt wie die Höhenbestimmung aus dem Luftdruck: eine eindeutig bekannte Funktion ermöglicht es, Messwerte in eine andere physikalische Größe umzuwandeln.

Anhang zu Punkt 7: Warum nimmt der Luftdruck mit der Höhe ab?

Um zu verstehen, warum der Luftdruck mit der Höhe abnimmt, kann man sich zuerst eine ganz andere Situation anschauen, die viele kennen. Wenn man beim Schwimmen oder Tauchen immer tiefer ins Wasser geht, beginnen die Ohren zu schmerzen. Der Grund dafür ist, dass der Druck mit der Tiefe zunimmt. Aber woher kommt dieser Druck eigentlich?

Der Druck entsteht dadurch, dass sich immer mehr Wasser über einem befindet. Dieses Wasser hat Gewicht und drückt durch seine Gewichtskraft auf alles, was darunter liegt, also auch auf die Ohren. Je tiefer man taucht, desto größer ist die Wassersäule über einem und desto stärker wird der Druck.

Ein ähnlicher Effekt lässt sich auch mit einem einfachen Versuch im Wasserglas beobachten. Wenn man ein Objekt in Wasser eintaucht, verdrängt es einen Teil des Wassers. Dieses verdrängte Wasser „möchte“ seinen ursprünglichen Platz wieder einnehmen und übt dabei eine Kraft auf das Objekt aus. Diese Kraft nennt man Auftrieb. Ihre Stärke entspricht genau der Gewichtskraft des verdrängten Wassers. Dieses Prinzip wurde bereits von Archimedes beschrieben.

Der entscheidende Punkt ist hier, dass Flüssigkeiten und auch Gase durch ihr eigenes Gewicht Druck erzeugen. Genau das passiert auch mit der Luft. Über uns befinden sich viele Schichten Luft, die zusammen eine große Masse haben. Diese Luft wird durch die Schwerkraft nach unten gezogen und drückt dadurch auf die unteren Schichten und letztlich auch auf uns.

Wenn man nun in die Höhe geht, zum Beispiel auf einen Berg, wird die Luftschicht über einem immer kleiner. Es befindet sich also weniger Luft über einem, die nach unten drücken kann. Dadurch nimmt der Druck ab. Gleichzeitig wird die Luft auch dünner, weil weniger Teilchen vorhanden sind.

Man kann also sagen, dass der Luftdruck genau wie der Wasserdruck durch das Gewicht des darüber liegenden Mediums entsteht. Beim Wasser ist es die Wassersäule, bei der Luft sind es die Luftschichten. Je mehr davon über einem liegt, desto größer ist der Druck. Je weniger darüber liegt, desto kleiner wird er. Genau deshalb nimmt der Luftdruck mit der Höhe ab.

2.2.8 Einfluss eines längeren Kabels

Danach wollten wir wissen, ob die Messung durch ein längeres Kabel beeinflusst wird. Dabei spielt eine wichtige Überlegung eine Rolle. Ein längeres Kabel hat einen größeren elektrischen

Widerstand. Dieser zusätzliche Widerstand könnte theoretisch die Signalübertragung beeinflussen und damit die Eichung des Sensors verfälschen, sodass die gemessenen Temperaturwerte leicht vom tatsächlichen Wert abweichen.

Um das zu überprüfen, haben wir den Sensor über ein 1 m langes Kabel angeschlossen und den Versuch unter gleichen Bedingungen wiederholt. Anschließend haben wir die neuen Messwerte mit den ursprünglichen verglichen.

Dabei zeigte sich, dass kein erkennbarer Unterschied zwischen den beiden Messreihen besteht. Die Kurven lagen praktisch genau übereinander. Dies ist auch in der zugehörigen Grafik gut zu sehen, in der sich beide Verläufe decken.

Daraus können wir schließen, dass der zusätzliche Widerstand des längeren Kabels in unserem Fall keinen messbaren Einfluss auf die Ergebnisse hat und das Kabel problemlos verwendet werden kann.

4.3 Weitere Tests bei niedrigen Temperaturen

Zum Schluss haben wir den Sensor noch in einer Kühltruhe getestet, zusammen mit mehreren anderen, vorgeeichten Laborthermometern. Die Ergebnisse waren insgesamt sehr ähnlich, was uns zunächst Vertrauen in die Genauigkeit des Sensors gegeben hat.

Dabei ist jedoch wichtig zu beachten, dass auch vorgeeichte Laborthermometer nicht perfekt sind. Mit der Zeit können sich ihre Messwerte leicht verändern. Dieser Effekt wird als Drift bezeichnet und entsteht zum Beispiel durch Materialalterung oder kleine Veränderungen in den Sensoreigenschaften. Dadurch kann es zu geringfügigen Abweichungen kommen, auch wenn die Geräte ursprünglich sehr genau kalibriert wurden.

Beim Vergleich der Messwerte zeigte sich, dass die Abweichungen des Sensors Sensirion SHT45 im gleichen Bereich liegen wie die der Laborthermometer. In der zugehörigen Grafik, in der die Temperaturverläufe aller Sensoren über die Zeit dargestellt sind, ist zu erkennen, dass sich die Kurven sehr ähnlich verhalten und nur kleine Unterschiede aufweisen.

Das bestätigt, dass der Sensor auch bei niedrigen Temperaturen zuverlässig misst und sich im Rahmen der üblichen Messunsicherheiten bewegt.

Anhang: Temperatur mit Trockeneis im isolierten Behälter

Ein weiterer Versuch ist bereits geplant, bei dem wir mit Trockeneis Temperaturen zwischen -50 °C und -80 °C erreichen wollen. Damit wollen wir Bedingungen simulieren, wie sie in der hohen Atmosphäre vorkommen.

Dabei stellt sich die Frage, welche Temperatur sich tatsächlich in einem mit Styropor isolierten Behälter einstellen kann. Trockeneis ist festes Kohlenstoffdioxid und hat eine feste Temperatur von etwa -78,5 °C bei normalem Luftdruck. Es schmilzt nicht wie normales Eis, sondern geht direkt vom festen in den gasförmigen Zustand über. Dieser Vorgang wird Sublimation genannt.

Solange noch Trockeneis im Behälter vorhanden ist, bleibt seine Oberfläche konstant bei dieser Temperatur. Die Umgebung im Behälter kann sich dieser Temperatur annähern, erreicht sie aber meist nicht vollständig. Der Grund dafür ist, dass ständig Wärme von außen durch die Isolierung eindringt und sich im Inneren verteilt.

In einem gut isolierten Styroporbehälter stellt sich daher typischerweise eine Temperatur ein, die etwas über der Trockeneistemperatur liegt. Je nach Aufbau, Luftzirkulation und Position des Sensors sind Werte im Bereich von etwa -60 °C bis -75 °C realistisch. Direkt in Kontakt mit dem Trockeneis kann der Sensor auch Temperaturen nahe -78,5 °C messen, während in etwas größerem Abstand höhere Temperaturen auftreten.

Das bedeutet, dass man mit Trockeneis sehr gut den gewünschten Temperaturbereich abdecken kann, der für die Simulation von Bedingungen in der oberen Troposphäre und unteren Stratosphäre relevant ist.

4.4 Abschließende Betrachtung und Schlussfolgerung

Im Laufe des Versuchs hat sich unsere ursprüngliche Vorstellung mehrfach geändert. Anfangs dachten wir, wir messen direkt die Wärmestrahlung, später wurde klar, dass wir eigentlich die erwärmte Luft messen. Durch die Auswertung der Daten haben wir trotzdem einen klaren Zusammenhang zwischen Temperatur und Entfernung gefunden.

Besonders interessant war, dass wir sowohl das 1/r Gesetz als auch das $1/r^2$ Gesetz in unseren Daten wiederfinden konnten. Außerdem haben wir gelernt, dass man aus einer solchen Beziehung auch wieder zurückrechnen kann, was ein wichtiges Prinzip in der Physik und Technik ist.

Der Versuch hat gezeigt, dass man durch genaues Beobachten und Hinterfragen auch aus unerwarteten Ergebnissen neue Erkenntnisse gewinnen kann.

5.Kapitel: Team Insights

Die Teammitglieder spielen eine wichtige Rolle bei der Umsetzung des Projekts. Jeder übernimmt dabei unterschiedliche Aufgaben, zum Beispiel die Planung, den Aufbau des Wetterballons oder die Auswertung der gesammelten Daten.

Durch die Zusammenarbeit können Ideen ausgetauscht und Probleme gemeinsam gelöst werden. So trägt jedes Teammitglied mit seinen Fähigkeiten und seinem Wissen dazu bei, dass das Projekt erfolgreich durchgeführt werden kann.

Die Teamarbeit ist deshalb ein zentraler Bestandteil, da sie nicht nur die Qualität der Ergebnisse verbessert, sondern auch den gesamten Ablauf effizienter und strukturierter macht.

Unser Team besteht aus diesen Leuten:

Name	*Alter*	*Jahre im Projekt*	*Hauptrolle*
Magnus	16	3	Projektkoordination
Noah	16	3	Flugberechnungen Modelle, Konstruktion
Albert	17	3	Programmierung, Auswertung
Elodie	17	3	Tests, Messungen
Shane	15	2	Test und Programmierung der Sensoren
Maxime	13	1	Test- und Programmierungsgehilfe

Weitere Aufgaben	*Wissenschaftlicher Bereich*	*Skala (von 1 bis 9)*	
		Interesse	*Wohlfühlen*
Reports, Organisation	Engineering / Management	9	9
Modelle, Konstruktion	Mathematik / Physik	8	7
Programmierung, Auswertung	Physik / Astrophysik	9	8
Tests, Messungen	Physik / Experimente	8	8
Test der Sensoren	Physik / Sensorik	9	9

6.Kapitel: Launch Day

„Launch Day StratoFlight“ bezeichnet den experimentellen Testflug, der darauf abzielt, die im Rahmen des Projekts gewonnenen Erkenntnisse anschaulich darzustellen und unter realen Bedingungen zu validieren. In enger Kooperation mit dem **Forschungsteam von LEM Science** wurde dieser Stratosphärenflug über einen Zeitraum von zwei Jahren sorgfältig konzipiert, geplant und vorbereitet.

Nun ist der entscheidende Moment gekommen: Ein mit wissenschaftlicher Nutzlast ausgestatteter Ballon wird in große Höhen der Erdatmosphäre aufsteigen, um wertvolle Messdaten zu erfassen und die entwickelten Systeme im praktischen Einsatz zu testen.

Nach der intensiven Vorbereitungsphase blicken alle Beteiligten diesem Ereignis mit großer Spannung entgegen. Die Vorfreude ist ebenso spürbar wie eine gewisse Nervosität, denn nun wird sich zeigen, ob die zahlreichen Überlegungen, Berechnungen und Entwicklungen erfolgreich umgesetzt werden konnten. Entsprechend groß ist die Erwartung, den Ausgang dieses Projekts zu erleben und die Ergebnisse in der Praxis zu beobachten.

Ziel dieses Fluges ist es, aussagekräftige Messdaten zu gewinnen sowie die Funktionsfähigkeit und Zuverlässigkeit der eingesetzten Messinstrumente unter authentischen Umweltbedingungen zu testen. Derartige Experimente leisten einen wichtigen Beitrag zum Verständnis atmosphärischer Prozesse und zur praktischen Anwendung naturwissenschaftlicher Methoden.

Der Start ist im Rahmen der **Forschertage von LEM Science zwischen dem 22. Und 26. Juni 2026** auf dem Schulgelände des Lycée Ermesinde geplant. (siehe Plakat im Anhang)

Die Veranstaltung bietet allen Interessierten die Möglichkeit, wissenschaftliche Forschung unmittelbar zu erleben, Einblicke in experimentelle Arbeitsweisen zu gewinnen und sich über die Hintergründe, sowie Zielsetzungen des Projekts zu informieren.

Launch
Day
StratoFlight
FORSCHUNGSTEAM
aus LEM Science
ZEIT
während den Forschertagen
vom 22. - 26. Juni 2026
ORT
im Schulhof vom
Lycée Ermesinde
LYCÉE
ERMESINDE
MERSCH

Epilog – Dank und Anerkennung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die mich während der Erstellung dieser Arbeit unterstützt und begleitet haben. Die Durchführung dieses Projekts war für mich eine wertvolle Erfahrung, die ohne die Hilfe anderer in dieser Form nicht möglich gewesen wäre.

Ein ganz besonderer Dank gilt Herrn Majerus, der mich während der gesamten Arbeit fachlich begleitet hat. Durch seine kompetente Unterstützung und seine klaren, verständlichen Erklärungen hat er wesentlich dazu beigetragen, dass ich die theoretischen Grundlagen dieses Themas besser verstehen und einordnen konnte. Gerade bei komplexeren physikalischen Zusammenhängen war seine Hilfe für mich von großer Bedeutung. Er hat sich stets die Zeit genommen, meine Fragen ausführlich zu beantworten und mir neue Denkanstöße zu geben. Seine Hinweise haben mir geholfen, mein physikalisches Wissen weiterzuentwickeln und meine Arbeit zu strukturieren und inhaltlich zu verbessern. Besonders schätze ich seine Geduld, sein Engagement und seine Leidenschaft, mit dem er mich während des gesamten Projekts unterstützt hat.

Ebenso möchte ich mich herzlich bei meinem Team bedanken: Magnus, Noah, Albert und Elodie. Die Zusammenarbeit war von Anfang an sehr angenehm und konstruktiv. Alle Mitglieder der Gruppe haben zuverlässig und engagiert mitgearbeitet und ihre Aufgaben verantwortungsbewusst erfüllt. Durch den offenen Austausch von Ideen und die gegenseitige Unterstützung konnten wir viele Herausforderungen gemeinsam bewältigen. Die gute Teamarbeit hat nicht nur dazu beigetragen, bessere Ergebnisse zu erzielen, sondern hat auch den Arbeitsprozess deutlich erleichtert und motivierender gemacht. Rückblickend lässt sich sagen, dass wir durch die enge Zusammenarbeit im Team in den vergangenen zwei Jahren sowohl fachlich als auch persönlich gewachsen sind und unsere Kenntnisse im Bereich der Physik nachhaltig erweitern konnten.

Darüber hinaus danke ich allen, die mich indirekt unterstützt haben, sei es durch hilfreiches Feedback, Motivation oder einfach durch ihr Interesse an meiner Arbeit. Auch diese Unterstützung hat einen wichtigen Beitrag zum Gelingen meines Trape-Projekts geleistet.

Zum Abschluss ist hervorzuheben, dass diese Arbeit maßgeblich von der Unterstützung und dem Engagement der genannten Personen profitiert hat. Ohne deren Beitrag wäre eine Umsetzung auf diesem Niveau nicht möglich gewesen. Dafür spreche ich meinen herzlichen Dank aus.

Anhang

1. Mathematische Regeln zu den Ungleichheiten

Diese Operationen ändern nicht das Ungleichheitszeichen:

- Addition / Subtraktion
- Quadrieren
- Wurzelziehen

Diese Operationen ändern das Zeichen:

- Multiplikation mit negativen Zahlen
- Kehrwert bilden (Inversion)

2. Ungleichungen – Beispiele

a) Addition/Subtraktion: Zeichen bleibt gleich

$+3 < +5 \quad |+2 \quad \Rightarrow \quad 3+2 < 5+2 \quad \Rightarrow \; +5 < +7$

$-3 < +5 \quad |-2 \quad \Rightarrow \; -3-2 < 5-2 \quad \Rightarrow \; -5 < +3$

b) Multiplikation mit positiver Zahl: Zeichen bleibt gleich

$+2 < +3 \quad |\cdot(+2) \quad \Rightarrow \quad 2 \cdot 2 < 3 \cdot 2 \quad \Rightarrow \; +4 < +9$

$-2 < +3 \quad |\cdot(+2) \quad \Rightarrow (-2) \cdot 2 < 3 \cdot 2 \quad \Rightarrow \; -4 < +9$

$-3 < -2 \quad |\cdot(+2) \quad \Rightarrow \; -6 < -4$

c) Quadrieren (bei positiven Zahlen!): Zeichen bleibt gleich

$+2 < +3 \quad |^2 \quad \Rightarrow \quad 2^2 < 3^2 \quad \Rightarrow \; +4 < +9$

d) Wurzelziehen: Zeichen bleibt gleich

$+4 < +9 \quad |\sqrt{} \quad \Rightarrow \quad \sqrt{4} < \sqrt{9} \quad \Rightarrow \; +2 < +3$

ABER

e) Multiplikation mit negativer Zahl: Vorzeichen kehrt sich um

$+2 < +3 \quad |\cdot(-1) \quad \Rightarrow \; 2 \cdot (-1) > 3 \cdot (-1) \; \Rightarrow \; -2 > -3$

$+2 < +3 \quad |\cdot(-2) \quad \Rightarrow \; 2 \cdot (-2) > 3 \cdot (-2) \; \Rightarrow \; -4 > -6$

$-2 < +3 \quad |\cdot(-2) \quad \Rightarrow \; +4 > -6$

$-3 < -2 \quad |\cdot(-2) \quad \Rightarrow \; +6 > +4$

2. Quadrieren (bei negativen Zahlen!): Vorzeichen kehrt sich um

$-3 < -2 \quad |^2 \qquad \Rightarrow \quad (-3)^2 > (-2)^2 \qquad \Rightarrow \; +9 > +4$

3. Inversion: Vorzeichen ebenfalls immer umgekehrt!

$+2 < +4 \quad |^{-1} \qquad \Rightarrow \qquad \frac{1}{2} > \frac{1}{4} \qquad \Rightarrow \; 0{,}5 > 0{,}25$

oder:

$-0{,}5 < -0{,}25 \qquad \Rightarrow \qquad -\frac{1}{2} < -\frac{1}{4} \quad |^{-1} \quad \Rightarrow \; -2 > -4$

3. Beweis von: $\gamma \geq 1$

Schrittweise:

$0 \leq v < c \qquad |\cdot \frac{1}{c}$

$0 \leq \beta < 1 \qquad |^2$

$0 \leq \beta^2 < 1 \qquad |\cdot(-1)$

$0 \geq -\beta^2 > -1 \qquad | +1$

$1 \geq 1 - \beta^2 > 0 \qquad |^{-1}$

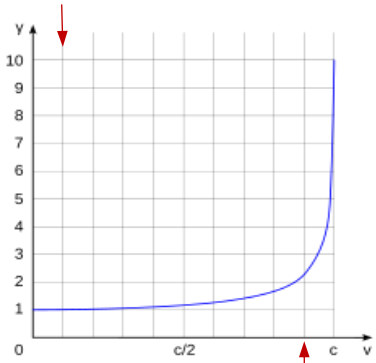
$1 \leq \frac{1}{1-\beta^2} < \infty$

$1 \leq \gamma^2 < \infty \qquad | \sqrt{}$

$1 \leq \gamma < \infty \qquad \Rightarrow \qquad \gamma \geq 1$

Beispiele

- $v = 0 \rightarrow \beta = 0 \rightarrow \gamma = 1$
- $v = 0{,}1\,c = 10\%\,c$ ergibt: $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-0{,}01}} = \frac{1}{\sqrt{0{,}99}} = 1{,}005$ (relativistische Grenze von 10%)
- $v = 0{,}6\,c = 60\%\,c$ ergibt: $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-0{,}36}} = \frac{1}{\sqrt{0{,}64}} = \frac{1}{0{,}8} = \frac{5}{4} = 1{,}25$
- $v = 0{,}8\,c = 80\%\,c$ ergibt: $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-0{,}64}} = \frac{1}{\sqrt{0{,}36}} = \frac{1}{0{,}6} = \frac{5}{3} \approx 1{,}67$
- $v = 0{,}95\,c = 95\%\,c$ ergibt: $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-0{,}95^2}} \approx 3{,}20$
- $v = 0{,}995\,c = 99{,}5\%\,c$ ergibt: $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-0{,}995^2}} \approx 10{,}0$



Der Lorentzfaktor steigt sehr flach bis zur relativistischen Grenze ($\beta = 50\%$) und nimmt dann ab 90% sprunghaft zu.

MATHEMATISCHE REGELN ZU DEN UNGLEICHHEITEN

DIESE OPERATIONEN ÄNDERN NICHT DAS UNGLEICHHEITSZEICHEN

Addition / Subtraktion	$a < b \Rightarrow a + c < b + c$
Quadrieren	$a < b \Rightarrow a^2 < b^2$
Wurzelziehen	$a < b \Rightarrow \sqrt{a} < \sqrt{b}$ (für $a, b \geq 0$)

DIESE OPERATIONEN ÄNDERN DAS UNGLEICHHEITSZEICHEN

Multiplikation mit negativen Zahlen	$a < b \Rightarrow (-c) \cdot a > (-c) \cdot b$ ($c > 0$)
Kehrwert bilden (Inversion)	$0 < a < b \Rightarrow \frac{1}{a} > \frac{1}{b}$ ($a, b > 0$)

BEWEIS: $\gamma \geq 1$

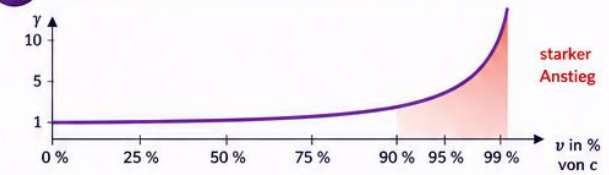
1	$0 \leq v < c$	$\mid \cdot \frac{1}{c}$
2	$0 \leq \beta < 1$ mit $\beta = \frac{v}{c}$	$\mid ^2$
3	$0 \leq \beta^2 < 1$	$\mid \cdot (-1)$
4	$0 \geq -\beta^2 > -1$	$\mid + 1$
5	$1 \geq 1 - \beta^2 > 0$	$\mid \cdot \frac{1}{1-\beta^2}$
6	$1 \leq \frac{1}{1-\beta^2} < \infty$	
7	$1 \leq \gamma^2 < \infty$ mit $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$	$\mid \cdot \sqrt{}$
8	$1 \leq \gamma < \infty$	

Da $\gamma \geq 1$, ist die Zeitdilatation möglich!
(Uhren in Bewegung gehen langsamer.)

BEISPIELE

v in % von c	$\beta = \frac{v}{c}$	$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$	γ (ca.)
0 %	0	$\frac{1}{\sqrt{1-0^2}} = 1$	1,00
10 %	0,10	$\frac{1}{\sqrt{1-0,01}} = \frac{1}{\sqrt{0,99}}$	1,005
60 %	0,60	$\frac{1}{\sqrt{1-0,36}} = \frac{1}{\sqrt{0,64}} = \frac{1}{0,8} = \frac{5}{4}$	1,25
80 %	0,80	$\frac{1}{\sqrt{1-0,64}} = \frac{1}{\sqrt{0,36}} = \frac{1}{0,6} = \frac{5}{3}$	1,67
95 %	0,95	$\frac{1}{\sqrt{1-0,95^2}}$	3,20
99,5 %	0,995	$\frac{1}{\sqrt{1-0,995^2}}$	10,0

Der Lorentzfaktor γ steigt sehr flach bis zur relativistischen Grenze ($\beta = 50$ %) und nimmt dann ab 90 % sprunghaft zu.



REGELN BEI UNGLEICHUNGEN – BEISPIELE

1. Addition / Subtraktion: Zeichen bleibt gleich

$+3 < +5 \mid +2 \Rightarrow 3 + 2 < 5 + 2 \Rightarrow +5 < +7$
$-3 < +5 \mid -2 \Rightarrow -3 - 2 < 5 - 2 \Rightarrow -5 < +3$

2. Multiplikation mit positiver Zahl: Zeichen bleibt gleich

$+2 < +3 \mid \cdot (+2) \Rightarrow 2 \cdot 2 < 3 \cdot 2 \Rightarrow +4 < +9$
$-2 < +3 \mid \cdot (+2) \Rightarrow (-2) \cdot 2 < 3 \cdot 2 \Rightarrow -4 < +9$
$-3 < -2 \mid \cdot (+2) \Rightarrow (-3) \cdot 2 < (-2) \cdot 2 \Rightarrow -6 < -4$

3. Quadrieren (bei positiven Zahlen!): Zeichen bleibt gleich

$+2 < +3 \mid ^2 \Rightarrow 2^2 < 3^2 \Rightarrow +4 < +9$

4. Wurzelziehen: Zeichen bleibt gleich

$+4 < +9 \mid \sqrt{} \Rightarrow \sqrt{4} < \sqrt{9} \Rightarrow +2 < +3$

WICHTIG:
Beim Quadrieren und Wurzelziehen müssen beide Seiten nichtnegativ sein, damit das Zeichen gleich bleibt!

DAS UNGLEICHHEITSZEICHEN KEHRT SICH UM

1. Multiplikation mit negativer Zahl: Vorzeichen kehrt sich um

$+2 < +3 \mid \cdot (-1) \Rightarrow 2 \cdot (-1) > 3 \cdot (-1) \Rightarrow -2 > -3$
$+2 < +3 \mid \cdot (-2) \Rightarrow 2 \cdot (-2) > 3 \cdot (-2) \Rightarrow -4 > -6$
$-2 < +3 \mid \cdot (-2) \Rightarrow (-2) \cdot (-2) > 3 \cdot (-2) \Rightarrow +4 > -6$
$-3 < -2 \mid \cdot (-2) \Rightarrow (-3) \cdot (-2) > (-2) \cdot (-2) \Rightarrow +6 > +4$

2. Quadrieren (bei negativen Zahlen!): Vorzeichen kehrt sich um

$-3 < -2 \mid ^2 \Rightarrow (-3)^2 > (-2)^2 \Rightarrow +9 > +4$

3. Inversion (Kehrwert bilden): Vorzeichen kehrt sich um

$+2 < +4 \mid (-1) \Rightarrow \frac{1}{2} > \frac{1}{4} \Rightarrow 0,5 > 0,25$
oder: $-0,5 < -0,25 \Rightarrow -\frac{1}{2} < -\frac{1}{4} \mid (-1) \Rightarrow -2 > -4$

ACHTUNG:
Beim Kehrwert bilden muss $0 < a < b$ gelten, sonst ist die Umkehrung nicht erlaubt!

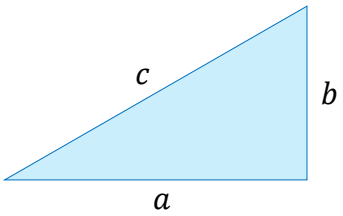
ZUSAMMENGEFASST
Mit diesen Regeln kann man Ungleichungen sicher umformen – ein wichtiges Werkzeug in der Mathematik und Physik!

4. Satz des Pythagoras (Geometrischer Beweis)

Der **Satz des Pythagoras** beschreibt eine grundlegende Beziehung in der Geometrie von rechtwinkligen Dreiecken. Er besagt, dass die Fläche des Quadrats über der Hypotenuse genau der Summe der Flächen der Quadrate über den beiden Katheten entspricht.

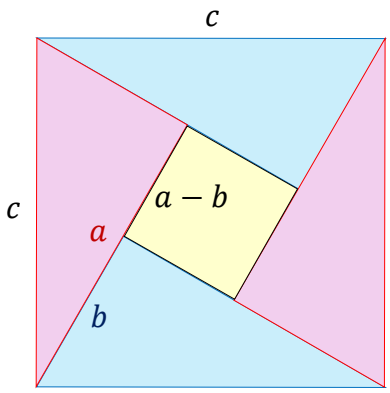
Ein geometrischer Beweis kann über eine Flächenzerlegung erfolgen. Dazu betrachtet man ein großes Quadrat, dessen Seitenlänge der Hypotenuse c entspricht. Die gesamte Fläche dieses Quadrats ist damit eindeutig festgelegt und beträgt c^2.

Rechtwinkeliges Dreieck:



Konstruktion: Quadrat mit Seite c

Gesamtfläche: c^2



Innerhalb dieses Quadrats wird eine bestimmte Anordnung von vier kongruenten rechtwinkligen Dreiecken vorgenommen. Diese Dreiecke sind so platziert, dass ihre Hypotenusen die Seiten des äußeren Quadrats bilden und ihre Katheten nach innen zeigen.

Jedes dieser Dreiecke besitzt den Flächeninhalt $\frac{1}{2}ab$. Zusammen ergeben die vier Dreiecke somit eine Gesamtfläche von $2ab$.

Durch die Anordnung der Dreiecke bleibt in der Mitte eine freie Fläche übrig. Diese Fläche hat die Form eines Quadrats. Seine Seitenlänge ergibt sich aus der geometrischen Struktur der Anordnung und entspricht der Differenz der Katheten-Längen. Der Flächeninhalt dieser mittleren Fläche ist daher $(a-b)^2$.

Flächenzerlegung:

- 4 Dreiecke: $4 \cdot \frac{ab}{2} = 2ab$ (oder 2 zusammengelegte Rechtecke, rot und blau)
- Kleines mittlere Quadrat: $(a-b)^2$

Da die gesamte Fläche des äußeren Quadrats vollständig aus den vier Dreiecken und der mittleren Fläche besteht, kann man den Gesamtflächeninhalt auf zwei Arten beschreiben:

Einerseits als c^2, andererseits als Summe aus den Teilflächen der inneren Struktur.

Gesamtflächengleichung:

$$c^2 = 2ab + (a-b)^2$$

$$c^2 = 2ab + a^2 - 2ab + b^2$$

Satz des Pythagoras:

$$\boxed{c^2 = a^2 + b^2}$$

5. Arduino – Sketch: Mein Programm für den Sensor STH45

```
#include "Adafruit_SHT4x.h"

Adafruit_SHT4x sht4 = Adafruit_SHT4x();

const bool loopCtrOn = false;
const uint32_t step_ms = 1000;  // in ms (regular time step to show/store the data)

uint32_t timeStart; // loop time offset in ms
uint32_t timeLast;  // last time of data show/store in ms

uint32_t loopCounter = 0; // number of performed loops
uint32_t loopDataNbr = 0; // number of data shown/stored

// ********************************************************************************


void setup() {

  Serial.begin(115200); // Serial.begin(115200);

  uint32_t startWait = millis();
  while (!Serial && (millis() - startWait < 2000)) {
    delay(10);     // will pause Zero, Leonardo, etc until serial console opens
  }

  Serial.println(F("Adafruit SHT4x test"));
  if (! sht4.begin()) {
    Serial.println(F("Couldn't find SHT4x")
  Serial.print(F("Found SHT4x sensor: Serial number 0x"));
  Serial.println(sht4.readSerial(), HEX);

  // You can have 3 different precisions, higher precision takes longer
  sht4.setPrecision(SHT4X_HIGH_PRECISION);
  switch (sht4.getPrecision()) {
     case SHT4X_HIGH_PRECISION:
       Serial.println(F("High precision"));
       break;
     case SHT4X_MED_PRECISION:
       Serial.println(F("Med precision"));
       break;
     case SHT4X_LOW_PRECISION:
       Serial.println(F("Low precision"));
       break;
  }

  // You can have 6 different heater settings
  // higher heat and longer times uses more power
  // and reads will take longer too!
  sht4.setHeater(SHT4X_NO_HEATER);
  switch (sht4.getHeater()) {
     case SHT4X_NO_HEATER:
       Serial.println(F("No heater"));
       break;
     case SHT4X_HIGH_HEATER_1S:
       Serial.println(F("High heat for 1 second"));
       break;
     case SHT4X_HIGH_HEATER_100MS:
       Serial.println(F("High heat for 0.1 second"));
       break;
     case SHT4X_MED_HEATER_1S:
       Serial.println(F("Medium heat for 1 second"));
       break;
     case SHT4X_MED_HEATER_100MS:
       Serial.println(F("Medium heat for 0.1 second"));
       break;
```

```
      case SHT4X_LOW_HEATER_1S:
        Serial.println(F("Low heat for 1 second"));
        break;
      case SHT4X_LOW_HEATER_100MS:
        Serial.println(F("Low heat for 0.1 second"));
        break;
  }

  // Write data header
  if (loopCtrOn) {
    Serial.println("t(s) \t\tT(°C) \tH(%rH) \tLoopNbr");
  } else {
    Serial.println("t(s) \t\tT(°C) \tH(%rH)");
  }

  timeStart = millis();
  timeLast = timeStart;
}

// ****************************************************************************


void loop() {
  uint32_t time_ms = millis();
  uint32_t delta_ms = time_ms - timeLast;

  loopCounter++; // loopCounter = loopCounter + 1;

  if (delta_ms >= step_ms) {
    sensors_event_t humidity, temp;
    sht4.getEvent(&humidity, &temp); // populate temp and humidity with fresh data
      timeLast = time_ms;
      loopDataNbr++;
    Serial.print((float)(time_ms-timeStart)/1000.0, 3);
    Serial.print("\t\t");
    Serial.print(temp.temperature);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(humidity.relative_humidity);
    if (loopCtrOn) {
      Serial.print("\t");  Serial.print(loopCounter);
    }
    Serial.println();
  }
}
```

Bibliografie

1. Stratoflights (o. J.). *Full-Service Film Production on the Edge of Space*. https://www.stratoflights.com/en/
2. Stratoflights (o. J.). *Education – STEM-School Project at the Edge of Space*. https://www.stratoflights.com/en/education/
3. Stratoflights (o. J.). *Weather Balloon Shop – Equipment for Stratospheric Flights*. https://www.stratoflights.com/en/shop/
4. Stratoflights (2024). *Company Profile*. https://www.crunchbase.com/organization/stratoflights
5. Globalstar. (2023). *Taking Scientific Curiosity to Stratospheric Heights*. https://www.globalstar.com/en-ap/resource-center/case-studies/taking-scientific-curiosity-to-stratospheric-heigh
6. StratoStar (o. J.). *High-Altitude Balloon Programs for Education and Research*. https://stratostar.com/
7. Proyecto Estratósfera**.** (o. J.). *Links and Resources for High-Altitude Balloon Projects*. https://proyectoestratosfera.com/enlaces-de-inter%C3%A9s
8. Gill, A. et al. (2020). *Optical Night Sky Brightness Measurements from the Stratosphere*. https://arxiv.org/abs/2010.05145
9. Safonova, M. et al. (2025). *SAMPLE – Stratospheric Altitude Microbiology Probe for Life Existence*. https://arxiv.org/abs/2507.11581
10. Doi, A. et al. (2018). *Balloon-Borne Very Long Baseline Interferometry Experiment in the Stratosphere*. https://arxiv.org/abs/1812.04255
11. Pérez-Muñoz, A. et al. (2024). *Real-Time Onboard System for a Stratospheric Balloon Mission*. https://arxiv.org/abs/2402.04079
12. Globisens. (2020). *What's It Like Out There? Near-Space Weather Balloon Resources*. https://globisens.net/wp-content/uploads/2020/09/Whats-It-Like-Out-There.pdf
13. NASA. (verschiedene). *Scientific Ballooning Program*. https://www.nasa.gov/scientificballoons
14. European Space Agency (ESA). (o. J.). *Stratospheric Balloon Missions*. https://www.esa.int

15. National Scientific Balloon Facility. (o. J.). *High-Altitude Balloon Research*. https://www.csbf.nasa.gov
16. LeifiPhysik (o. J.). *Erster Einblick in die Relativitätstheorie*. https://www.leifiphysik.de/relativitaetstheorie/erster-einblick
17. LeifiPhysik (o. J.). *Spezielle Relativitätstheorie – Zeitdilatation (Grundwissen)*. https://www.leifiphysik.de/relativitaetstheorie/spezielle-relativitaetstheorie/grundwissen/zeitdilatation
18. Wikipedia (o. J.). *Zeitdilatation*. https://de.wikipedia.org/wiki/Zeitdilatation
19. NOAA (o. J.). *National Oceanic and Atmospheric Administration – Official Website*. https://www.noaa.gov
20. Deutscher Wetterdienst (DWD) (o. J.). *Offizielle Website*. https://www.dwd.de
21. Met Office (o. J.). *UK National Weather Service – Official Website*. https://www.metoffice.gov.uk
22. Deutscher Wetterdienst (o. J.). *Wetterballons und Radiosondenmessungen.* https://www.dwd.de/DE/forschung/meteorologie/radiosonden/radiosonden_node.html
23. Deutscher Wetterdienst (o. J.). *Atmosphäre und Wetterbeobachtung.* https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/klimadatendeutschland.html
24. NASA (o. J.). *Weather Balloons and Atmospheric Research.* https://www.nasa.gov
25. NOAA (o. J.). *Upper-Air Observations and Weather Balloons.* https://www.noaa.gov/jetstream/upperair/balloons.htm
26. Encyclopedia Britannica (o. J.). *Weather Balloon – Scientific Instrument.* https://www.britannica.com/science/weather-balloon
27. Met Office (o. J.). *Weather Balloons and Radiosondes Explained.* https://www.metoffice.gov.uk/weather/learn-about/weather/how-weather-works/weather-balloon
28. ESA (European Space Agency) (o. J.). *Atmospheric Research and Balloon Missions.* https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science
29. Wikipedia (o. J.). *Wetterballon.* https://de.wikipedia.org/wiki/Wetterballon
30. *Introduction to Weather Balloons* https://basicairdata.eu/knowledge-center/design/introduction-to-weather-balloons/